

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mirko Rožman

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Zdenka Keran

Student:

Mirko Rožman

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći stečeno znanje i iskustvo tijekom studija te navedenu literaturu.

Iskreno se zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Zdenki Keran na stručnoj pomoći te konstantnoj motivaciji, strpljenju i savjetovanju prilikom izrade teorijskog, numeričkog i eksperimentalnog dijela ovoga rada.

Zahvaljujem se i svim djelatnicima Katedre i Laboratorija za oblikovanje deformiranjem na pristupačnosti i pomoći prilikom provedbe eksperimenta.

Također se zahvaljujem profesoru dr.sc. Darku Landeku na pristupačnosti i korisnim savjetima u vezi mjerenja tvrdoće, kao i tehničkom suradniku Ivanu Vovku na pomoći prilikom ispitivanja tvrdoće.

Na posljetku bih se zahvalio svojoj obitelji i prijateljima na bezuvjetnoj podršci koju su mi pružili tijekom cijelog studija.

Mirko Rožman



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 9. 11. 2018.	Prilog:
Klasa: 602-04/18-6/13	
Ur. broj: 15-HOS-18-417	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MIRKO ROŽMAN** Mat. br.: 0035192303

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička simulacija postupka kutne ekstruzije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical simulation of equal channel angular extrusion**

Opis zadatka:

Kutna ekstruzija jest postupak značajne plastične deformacije koji uključuje troosno tlačno naprezanje materijala obratka i veliku smičnu deformaciju. Uglavnom se koristi radi utjecaja na mehanička svojstva metalnih materijala smanjivanjem veličine zrna i postizanjem homogene sitnozrnate mikrostrukture uslijed značajne plastične deformacije. S obzirom na jednostavnost provedbe i veliku mogućnost variranja izvedbe alata, a tako i utjecaja na svojstva i strukturu materijala, kutna ekstruzija je najčešće korišten postupak značajne plastične deformacije. U radu je potrebno opisati postupak kutne ekstruzije i detaljno objasniti mogućnosti utjecaja na mehanička svojstva metalnih materijala pri različitim izvedbama alata i različitim varijantama provođenja postupka kutne ekstruzije. Razmatranje utjecaja na svojstva materijala ograničiti na promatranje prve faze provođenja procesa koja ima najveći utjecaj na promjenu mehaničkih svojstava. Koristeći se prethodno opisanom teorijom potrebno je eksperimentalno provesti postupak kutne ekstruzije aluminijskog materijala u alatu s kutom 90° , izmjeriti sile oblikovanja u ovisnosti o vremenu te usporediti svojstvo tvrdoće materijala prije i nakon plastične deformacije. Isti postupak potrebno je numerički simulirati nekim od komercijalnih programskih paketa u dvodimenzionalnom i trodimenzionalnom prikazu, a rezultate numeričke simulacije usporediti sa eksperimentalnim podacima. Nadalje, korištenjem numeričke simulacije potrebno je varirati izvedbu alata s različitim kutovima između ulaznog i izlaznog kanala te usporediti podatke sila oblikovanja i naprezanja u materijalu. Na temelju usporedbe podataka dati zaključke o pozitivnim i negativnim stranama pojedinih varijanti izvedbe alata i pretpostavke o svojstvima materijala koja se mogu postići određenim postupkom. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:
29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:
05. prosinca 2018.
06. prosinca 2018.
07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Zdenka Keran

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS OZNAKA.....	III
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS TABLICA.....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Kutna ekstruzija – ECAP.....	2
1.1.1. Princip kutne ekstruzije.....	2
1.1.2. Utjecajni parametri kutne ekstruzije.....	3
2. METODA KONAČNIH ELEMENATA.....	6
2.1. Vrste konačnih elemenata.....	8
2.2. Dvodimenzijски konačni elementi.....	10
2.3. Trodimenzijски konačni elementi.....	12
3. NUMERIČKA ANALIZA KUTNE EKSTRUZIJE.....	13
3.1. Svojstva aluminiја.....	13
3.1.1. Krivulја tečenja aluminiја.....	14
3.2. Dvodimenzionalna simulaciја kutne ekstruzije.....	15
1. slučaj $\Phi = 90^\circ$	16
1. slučaj – rezultati.....	20
2. slučaj $\Phi = 110^\circ$	22
2. slučaj – rezultati.....	24
3. slučaj $\Phi = 125^\circ$	26
3. slučaj – rezultati.....	28
4. slučaj $\Phi = 135^\circ$	30

4. slučaj – rezultati.....	31
3.3. Zaključak dvodimenzionalne numeričke analize	33
3.4. Trodimenzionalna analiza kutne ekstruzije	35
5. slučaj $\Phi = 90^\circ$	39
5. slučaj – rezultati.....	42
6. slučaj $\Phi = 110^\circ$	44
6. slučaj – rezultati.....	45
7. slučaj $\Phi = 125^\circ$	47
7. slučaj – rezultati.....	48
8. slučaj $\Phi = 135^\circ$	50
8. slučaj – rezultati.....	51
3.5. Zaključak trodimenzionalne numeričke analize	53
3.6. Usporedba 2D i 3D numeričkih analiza	57
4. EKSPERIMENTALNA ANALIZA KUTNE EKSTRUZIJE	59
4.1. Usporedba sila oblikovanja	60
4.2. Usporedba tvrdoće uzorka	62
5. ZAKLJUČAK.....	64
LITERATURA	66
PRILOZI	67

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
Φ	°	Kut između ulaznog i izlaznog kanala matrice
d_{zrna}	nm	Promjer kristalnog zrna
ψ	°	Kut na vanjskom dijelu spoja kanala matrice
ε	-	Ekvivalentna vrijednost von Mises - ove deformacije
σ	MPa	Naprezanje plastičnog tečenja
t_{num}	h	Vrijeme potrebno za računanje numeričkog rješenja
$\varepsilon_{ekv,rač}$	-	Deformacija izračunata pomoću izraza (1)
$\varepsilon_{ekv,num}$	-	Deformacija dobivena numeričkim analizama

POPIS SLIKA

Slika 1 – Shematski prikaz alata za kutnu ekstruziju [1]	3
Slika 2 – Položaj kutova na ECAP alatu [1]	4
Slika 3 – Shematski prikaz strukture programa.....	7
Slika 4 – Vrste elemenata: a) kontinuumski, b) ljuskasti, c) gredni, d) kruti, e) membranski i f) štapni elementi [4]	8
Slika 5 – Konačni elementi s obzirom na broj čvorova i red interpolacije: a) linearni element, b) kvadratni element, c) modificirani element drugog reda [4].....	9
Slika 6 – Shematski prikaz četverokutnih elemenata: a) CPS4 i b) CPS4R [4].....	10
Slika 7 – a) C3D8 element, b) Točke integracije C3D8 [4].....	12
Slika 8 – Točka integracije C3D8R elementa [4]	12
Slika 9 – Prikaz ravnine poprečnog presjeka u kojemu se analizira 2D simulacija.....	15
Slika 10 – Dimenzije matrice – 1. slučaj.....	16
Slika 11 – Dimenzije žiga i uzorka – 1. slučaj	17
Slika 12 – Sklop svih dijelova – 1. slučaj	18
Slika 13 – Uzorak s različitim brojem konačnih elemenata a) 112 konačnih elemenata b) 448 konačnih elemenata c) 2800 konačnih elemenata	19
Slika 14 – Naprezanja po von Misesu – 1. slučaj.....	20
Slika 15 – Ekvivalentna plastična deformacija – 1. slučaj	21
Slika 16 – Dimenzije matrice – 2. slučaj.....	22
Slika 17 – Sklop svih dijelova i prikaz konačnih elemenata na uzorku – 2. slučaj.....	23
Slika 18 – Naprezanja po von Misesu – 2. slučaj.....	24
Slika 19 – Ekvivalentna plastična deformacija – 2. slučaj	25
Slika 20 – Sklop svih dijelova i prikaz konačnih elemenata – 3. slučaj.....	26
Slika 21 – Dimenzije matrice – 3. slučaj.....	27
Slika 22 – Naprezanja po von Misesu – 3. slučaj.....	28
Slika 23 – Ekvivalentna plastična deformacija – 3. slučaj	29
Slika 24 – Dimenzije matrice – 4. slučaj.....	30
Slika 25 – Naprezanja po von Misesu – 4. slučaj.....	31
Slika 26 – Ekvivalentna plastična deformacija – 4. slučaj	32

Slika 27 – Usporedba konačnih stanja uzoraka nakon dvodimenzionalnih simulacija.....	33
Slika 28 – Rubni uvjet simetrije cijelog modela oko ravnine XY	36
Slika 29 – Rubni uvjet pomaka uzorka za 140mm u negativnom smjeru osi Y	37
Slika 30 – Rubni uvjet uklještenja u točki matrice.....	38
Slika 31 – Dimenzije i sklop matrice i uzorka – 5. slučaj	39
Slika 32 – Definirani broj konačnih elemenata na matrici i uzorku.....	40
Slika 33 – Prikaz nepravilne simulacije kretanja materijala prilikom deformiranja	41
Slika 34 – Prikaz pravilne simulacije kretanja materijala prilikom deformiranja.....	41
Slika 35 – Naprezanja po von Misesu – 5. slučaj.....	42
Slika 36 – Ekvivalentna plastična deformacija – 5. slučaj	43
Slika 37 – Dimenzije matrice i sklop dijelova – 6. slučaj	44
Slika 38 – Naprezanja po von Misesu – 6. slučaj.....	45
Slika 39 – Ekvivalentna plastična deformacija – 6. slučaj	46
Slika 40 – Dimenzije matrice i sklop dijelova – 7. slučaj	47
Slika 41 – Naprezanja po von Misesu – 7. slučaj.....	48
Slika 42 – Ekvivalentna plastična deformacija – 7. slučaj	49
Slika 43 – Dimenzije matrice i sklop dijelova s konačnim elementima – 8. slučaj	50
Slika 44 – Naprezanja po von Misesu – 8. slučaj.....	51
Slika 45 – Ekvivalentna plastična deformacija – 8. slučaj	52
Slika 46 – Usporedba konačnih stanja uzoraka nakon trodimenzionalnih simulacija	53
Slika 47 – Prikaz načina izvođenja kutne ekstruzije – putanje: A, B _A , B _C i C [1].....	54
Slika 48 – Prikaz opreme i dijelova korištenih u eksperimentalnoj analizi	59
Slika 49 – Curenje materijala uzorka zbog deformacije matrice	60
Slika 50 – Usporedba sila oblikovanja dobivenih eksperimentalnom i numeričkom analizom	61
Slika 51 – Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom.....	62

POPIS TABLICA

Tablica 1 – Utjecaj kutova Φ i Ψ na plastičnu deformaciju, prema izrazu (1).....	5
Tablica 2 – Maseni udio elemenata u „komercijalno čistom“ aluminiju Al99,5 [5].....	13
Tablica 3 – Mehanička i fizikalna svojstva „komercijalno čistog“ aluminija Al99,5 [6]	13
Tablica 4 – Prikaz vrijednosti iščitanih iz krivulje tečenja čistog aluminija.....	14
Tablica 5 – Usporedba vremena potrebnog za rješavanje numeričkih analiza	56
Tablica 6 – Usporedba rezultata analize s izračunatim vrijednostima deformacije	57
Tablica 7 – Izmjerena tvrdoća prije i poslije kutne ekstruzije	63

SAŽETAK

Kutna ekstruzija (eng. Equal Channel Angular Pressing, ECAP) glavni je predstavnik postupaka značajne plastične deformacije (eng. Severe Plastic Deformation, SPD). ECAP omogućava postizanje sitnozrnate mikrostrukture kod metalnih materijala, a samim time i poboljšanje njihovih mehaničkih svojstava. Kako bi se konstruirao alat za kutnu ekstruziju bitno je poznavati utjecaj konstrukcije samog alata na ponašanje i distribuciju deformacije u materijalu te nastala naprezanja. U ovome radu, numeričkim modeliranjem analiziran je utjecaj jednog od najbitnijih parametara ovoga procesa - kuta između ulaznog i izlaznog kanala matrice (Φ).

U prvom dijelu rada ukratko je predstavljen postupak kutne ekstruzije te metoda konačnih elemenata. Zatim je ispitan utjecaj četiriju različitih konstrukcija alata na raspodjelu naprezanja prilikom obrade uzorka od čistog aluminijskog i prokomentirani su rezultati. Također, simulacija je provedena u dvodimenzionalnom i trodimenzionalnom sustavu te su uspoređeni dobiveni rezultati.

Kao posljednji dio rada, eksperimentalno je proveden postupak kutne ekstruzije na aluminijskom uzorku i to u alatu s matricom čiji su ulazni i izlazni kanali pod kutom od 90° . Ovim eksperimentom izmjereni su slijedeći podaci: ovisnost sile oblikovanja o vremenu te tvrdoća uzorka prije i poslije deformacije.

Na samom kraju prokomentirani su svi dobiveni rezultati te se na temelju usporedbe podataka svih analiza izvukao zaključak o pozitivnim i negativnim stranama pojedinih konstrukcija alata i pretpostavke o svojstvima materijala koja se mogu postići određenom konstrukcijom.

Ključne riječi: kutna ekstruzija, numerička analiza, metoda konačnih elemenata, obrada metala, mehanička svojstva

SUMMARY

Equal Channel Angular Pressing – ECAP (or Equal Channel Angular Extrusion – ECAE) represents the main process of Severe Plastic Deformation – SPD processes. ECAP ensures refined grain microstructure to be achieved in metal materials, thus improving their mechanical properties. In order to design a die for ECAP, it is important to know the die design influence on behavior and distribution of stress and strain being imposed to material. In this paper, numerical modeling is used for analysis of influence of one of the most significant parameters of this process – the angle between channels of the die (Φ).

At the beginning of paper, a short introduction about ECAP and Finite Element Method (FEM) is given. Then, analysis of influence of four different die designs is carried out and results are discussed. Stress distribution in these cases are investigated on pure aluminum workpiece. Furthermore, simulation is carried out in two-dimensional and three-dimensional system and the results are compared.

As a final part, an experiment of ECAP is carried out on an aluminum sample in a tool with an angle of 90° between channels of the die. This experiment is used to measure following information: deforming force over time distribution, and sample hardness before and after deformation.

At the end, all obtained results are discussed and conclusion is extracted based on comparison of the results from all analyses. Positive and negative sides of each tool designs are given as well as assumptions on material properties that can be achieved with each design.

Key words: Equal Channel Angular Extrusion, Numerical analysis, Finite Element Method, Metal processing, Mechanical properties

1. UVOD

Pokazalo se da materijali izrazito fine mikrostrukture s promjerima kristalnih zrna manjim od 500 nm posjeduju jedinstvena mehanička svojstva kao što su superplastičnost i visoka čvrstoća, stoga im se u posljednjih nekoliko godina pridodaje jako puno pažnje. Sitnozrnatu mikrostrukturu metalnih materijala moguće je postići na dva načina: toplinskom obradom ili plastičnom deformacijom. Kao glavni predstavnik postupaka značajne plastične deformacije, kutna ekstruzija, odličan je „alat“ za proizvodnju materijala s takvom kristalnom strukturom.

Temelj i početak razvoja postupaka značajne plastične deformacije još je 1930 – ih godina postavio američki fizičar Percy Williams Bridgman. U svojim istraživačkim radovima proučavao je fiziku visokih tlačnih naprezanja te kakav učinak ona mogu imati na svojstva i ponašanje tvari, za što je kasnije bio i nagrađen Nobelovom nagradom. Značajniji razvoj ovih postupaka počinje 70-ih i 80-ih godina.

Značajna plastična deformacija (SPD – *Severe Plastic Deformation*) je pojam koji označava skupinu tehnika za obradu metala koje uključuju troosno tlačno naprezanje deformiranog materijala i istovremenu veliku smičnu deformaciju. U tim uvjetima dolazi do velikog povećanja gustoće dislokacija i nastanka sitnozrnate mikrostrukture materijala obratka, gdje se postiže izrazito fina veličina zrna $d_{zrna} < 500$ nm (UFG - Ultra Fine Grain) ili čak nanokristalna struktura $d_{zrna} < 100$ nm (NC - Nanocrystalline). Uobičajena veličina zrna kod standardnih industrijskih metala je u rasponu od 10 - 100 μ m, a s obzirom na veličine zrna koje se mogu postići SPD postupcima, granica razvlačenja se može povećati više od 100%.

1.1. Kutna ekstruzija – ECAP

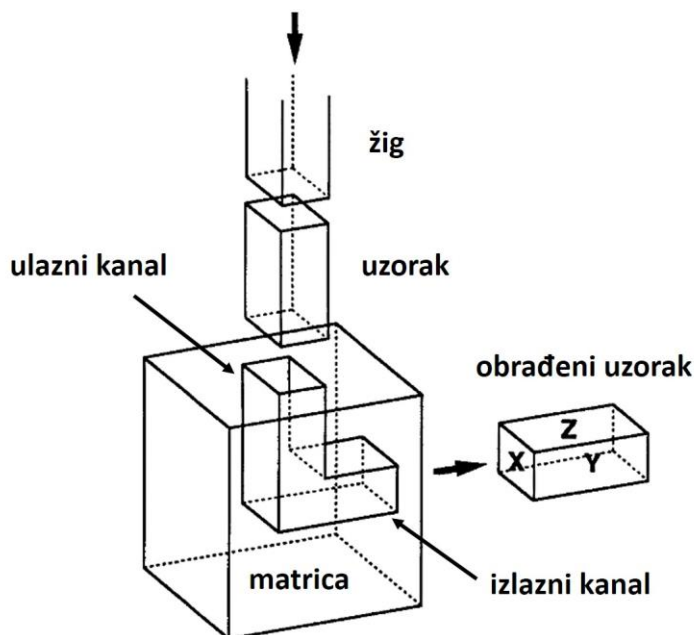
Najčešće istraživani i najčešće korišteni SPD postupak je kutna ekstruzija (ECAP – *Equal Channel Angular Pressing*) koji dokazano pospješuje mehanička svojstva komercijalno čistih metala, legura i kompozita. ECAP, kao i ostali SPD postupci, specifičnim načinom deformiranja materijala ostvaruje ekstremno smanjenje njegovih kristalnih zrna i dovodi njihovu veličinu u nano razinu (čak i ispod 100 nm). Takav učinak ni približno nije moguće ostvariti konvencionalnim postupcima toplinske obrade ili plastične deformacije. Većina istraživanja postupka kutne ekstruzije posvećena je relativno mekim metalima s plošno centriranom kubičnom kristalnom rešetkom (FCC – *Face Centered Cubic*), kao što su aluminij i bakar. No, ECAP pronalazi primjenu i u slučaju obrade kompleksnijih legura i čvrstih metala gdje je ograničen broj kliznih ravnina po kojima se ostvaruje njihova deformacija.

Postupnim razvojem kroz povijest, ovaj postupak nailazio je na mnoge prepreke koje su u većini slučajeva uspješno riješene, čime ECAP u današnje vrijeme postaje sve zanimljiviji proces obrade metala iz više razloga: prilično je jednostavno složiti i koristiti ECAP alat; postiže se značajna plastična deformacija bez promjene poprečnog presjeka uzorka, što omogućuje ponavljanje procesa i postizanje ekstremno visokih deformacija; iako se ECAP većinom koristi za obradu uzoraka u obliku kružnih ili pravokutnih šipki, razvijen je i način kutne ekstruzije primjenjiv na uzorcima u obliku ploča.

1.1.1. Princip kutne ekstruzije

Princip ECAP - a prilično je jednostavan, kao i alat potreban za njegovu provedbu: materijal koji se želi obraditi istiskuje se žigom kroz matricu koja se sastoji od ulaznog kanala spojenog pod određenim kutom (najčešće 90°) s izlaznim kanalom, poprečni presjek oba kanala jednak je poprečnom presjeku uzorka materijala koji se obrađuje. Shematski prikaz alata za kutnu ekstruziju prikazan je na Slici 1. Uzorak materijala prije ECAP - a, obrađuje se odvajanjem čestica na mjeru koja odgovara dimenzijama kanala matrice alata. Žig protiskuje uzorak kroz ulazni kanal i prelaskom u izlazni kanal, zbog određenog kuta između kanala, uzorak se plastično deformira i podvrgnut je smičnoj deformaciji. Jasno je za zaključiti da se poprečni presjek uzorka neće promijeniti nakon

izlaska iz matrice. Stoga, ECAP se potpuno razlikuje od klasičnog procesa obrade metala ekstruzijom, gdje poprečni presjek uzorka zasigurno doživljava promjenu.



Slika 1 – Shematski prikaz alata za kutnu ekstruziju [1]

1.1.2. Utjecajni parametri kutne ekstruzije

S obzirom da se poprečni presjek ispitnog uzorka nakon prolaska kroz alat ne mijenja, otvorena je mogućnost ponavljanja procesa beskonačno mnogo puta. Pa se tako postupak redovito provodi u više faza (najčešće ne više od 16)¹ jer se na taj način postiže ekstremno visok ukupni stupanj deformacije. Faktori koji najviše utječu na karakteristike postignute mikrostrukture procesom kutne ekstruzije su:

- način izvođenja kutne ekstruzije (rotiranje uzorka nakon svake faze)
- **kut između ulaznog i izlaznog kanala (ϕ)**
- kut na vanjskom dijelu spoja kanala matrice (ψ)
- brzina ekstruzije (brzina žiga) i
- radna temperatura.

¹ Nema smisla dalje ponavljati proces jer već nakon 12-te faze nema više nikakvog značajnijeg utjecaja na svojstva materijala.

Deformacija nametnuta obrađivanom materijalu tijekom jednog prolaska kroz matricu alata između ostalog ovisi o kutu Φ između ulaznog i izlaznog kanala matrice te kutu Ψ na vanjskom dijelu spoja tih dvaju kanala. Položaj kutova prikazan je na Slici 2, a izraz (1) prikazuje deformaciju unesenu u materijal nakon jednog prolaska uzorka kroz alat, u ovisnosti o tim kutovima [2]:

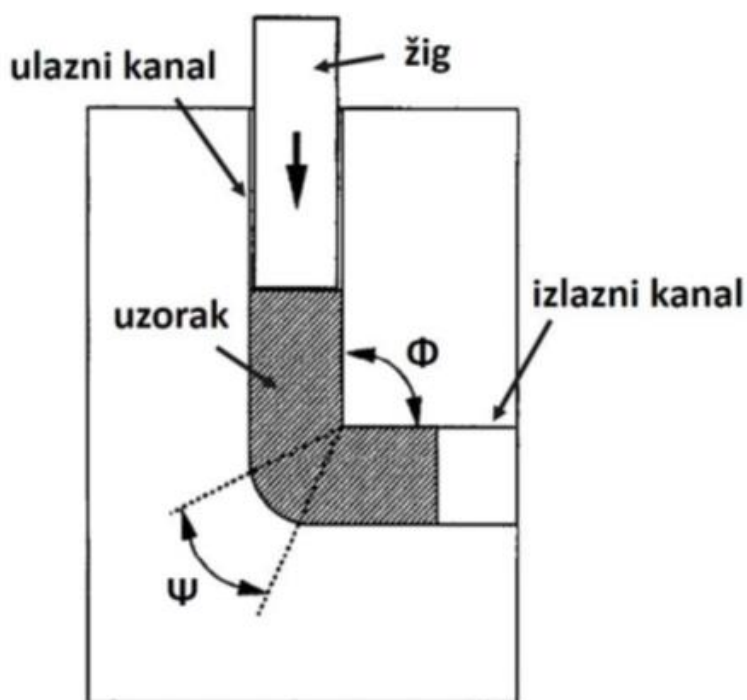
$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[2 \operatorname{ctg} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (1)$$

gdje je:

ε – deformacija materijala,

Φ – kut između ulaznog i izlaznog kanala matrice i

Ψ – kut na vanjskom dijelu spoja kanala matrice.



Slika 2 – Položaj kutova na ECAP alatu [1]

Prema izrazu (1), ukoliko kut Φ iznosi 90° , promatrajući izračunatu plastičnu deformaciju u ovisnosti o kutu Ψ (npr. u iznosima od 0° do 90° - Tablica 1, desno), primjećuje se da se rezultat postignut u materijalu nije znatnije promijenio. S druge strane, različiti kutovi Φ bitno utječu na deformaciju unesenu u materijal, što je vidljivo u Tablici 1 (lijevo).

Numeričkim analizama provedenim u ovome radu, dokazana je direktna povezanost između kuta kanala matrice Φ i plastične deformacije nametnute obrađivanom materijalu procesom kutne ekstruzije.

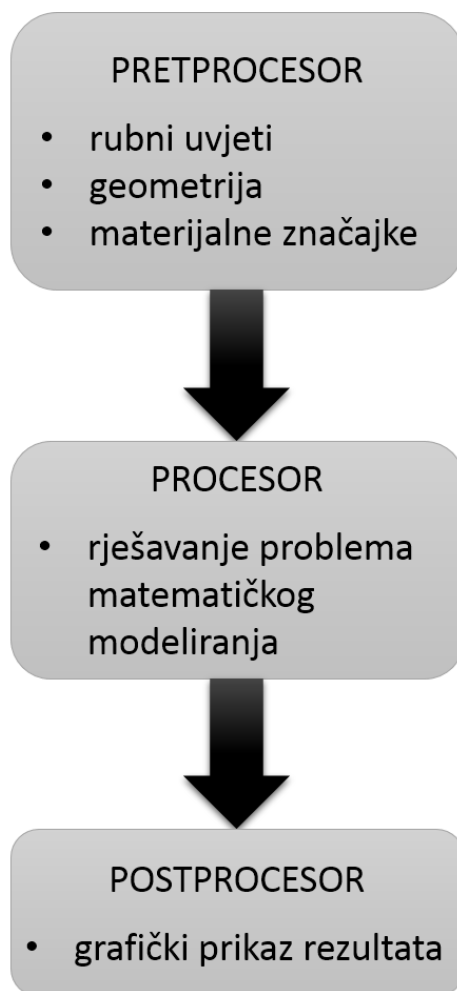
Tablica 1 – Utjecaj kutova Φ i Ψ na plastičnu deformaciju, prema izrazu (1)

Φ [°]	Ψ [°]	$\epsilon_{\text{ekv, rač}}$	Φ [°]	Ψ [°]	$\epsilon_{\text{ekv, rač}}$
45	30	2,00	90	0	1,15
75	30	1,27	90	15	1,08
90	30	1,02	90	30	1,02
110	30	0,74	90	45	0,97
125	30	0,57	90	60	0,94
135	30	0,46	90	90	0,91

2. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Problemi mehanike deformabilnih tijela koji se rješavaju klasičnim metodama, temelje se na rješavanju diferencijalnih jednačbi. Rješenje takvih jednačbi teško je zadovoljiti u cijelom području razmatranog modela te se takve metode rješavanja mogu primijeniti samo za jednostavnije proračunske modele. Kod kompliciranijih modela koriste se numeričke metode kojima se dobije približno rješenje tih diferencijalnih jednačbi. Neke od tih metoda su: metoda konačnih razlika, metoda konačnih volumena, metoda konačnih elemenata i bezmrežne metode. Najčešće se koristi metoda konačnih elemenata koja diferencijalne jednačbe zamjenjuje sustavom algebarskih jednačba. [3]

Metoda konačnih elemenata (FEM – *Finite Element Method*) [3] je numerička metoda za rješavanje diferencijalnih jednačbi, a temelji se na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Ovom metodom, područje kontinuuma s beskonačno mnogo stupnjeva slobode zamjenjuje se diskretnim modelom. Taj diskretni model sastoji se od međusobno povezanih konačnih elemenata s ograničenim brojem stupnjeva slobode gibanja. Također, potrebno je opisati polja fizikalnih veličina, poput polja deformacija, pomaka, naprezanja itd., a ta se polja opisuju interpolacijskim funkcijama. Te interpolacijske funkcije moraju zadovoljiti određene uvjete kako bi diskretizirani model što bolje oponašao ponašanje kontinuuma. Prvotno se te jednačbe izvode za svaki pojedinačni element, a kasnije se transformiraju u globalni sustav jednačbi. Složene konstrukcije potrebno je diskretizirati s velikim brojem konačnih elemenata pa algebarski sustav jednačbi sadrži mnogo nepoznanica. Iz tog razloga koriste se različiti računalni programi koji olakšavaju rješavanje problema metodom konačnih elemenata. Postoji mnogo programskih paketa koji koriste metodu konačnih elemenata, ali se osnovna shema programa uglavnom ne razlikuje. Struktura programa prikazana je na Slici 3.



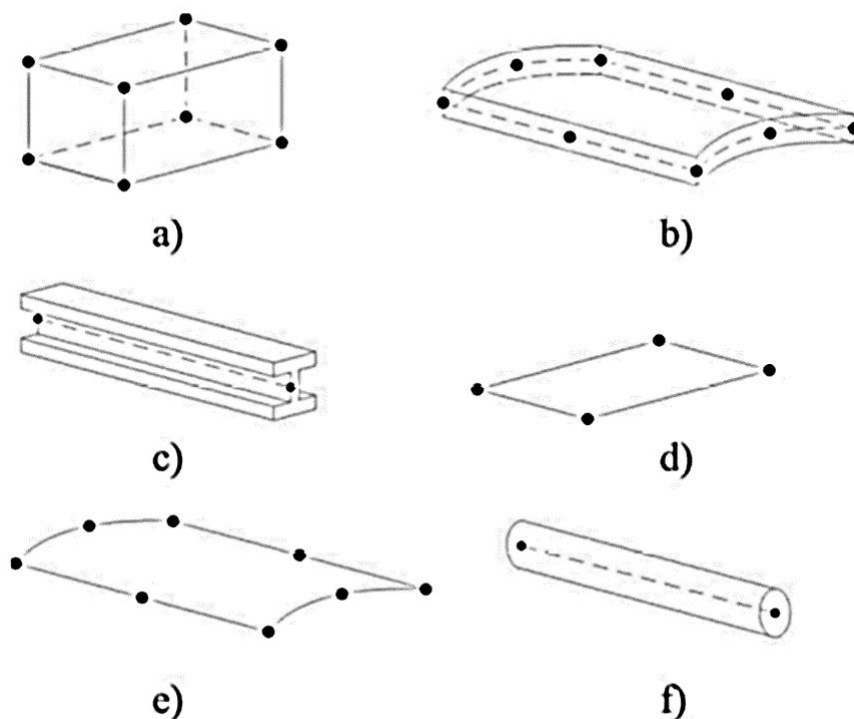
Slika 3 – Shematski prikaz strukture programa

Prvi korak je pokretanje pretprocesora u kojemu se definira geometrija modela u samom programu za numeričku analizu ili se može učitati iz nekog drugog CAD programa. Potom se definiraju opterećenje i rubni uvjeti te se zadaju svojstva materijala koji se proučava. Zatim se definira količina i vrsta konačnih elemenata i generira mreža konačnih elemenata. Nadalje, u procesoru se postavlja globalni sustav jednadžbi konačnih elemenata iz kojeg se izračunavaju polja fizikalnih veličina. Postprocesor na kraju grafički prikazuje rezultate izračunate u procesoru. Programski paket korišten u ovome radu za analizu procesa kutne ekstruzije je *Abaqus 6.13-1 (Student Edition)* [4].

2.1. Vrste konačnih elemenata

Karakteristike koje opisuju pojedinu vrstu konačnih elemenata su: vrsta elementa, broj čvorova, stupnjevi slobode, formulacija i integracija. Sukladno tome, u programskom paketu *Abaqus* svaka vrsta konačnog elementa ima određeni naziv (npr. B23, CPS4R, C3D8,...).

Vrstu konačnih elemenata [4] određuje geometrija modela koju se analizira, odnosno koju je potrebno diskretizirati. Slika 4 prikazuje neke od najčešće korištenih vrsta elemenata: kontinuumski, ljuskasti, gredni, kruti, membranski i štapni.

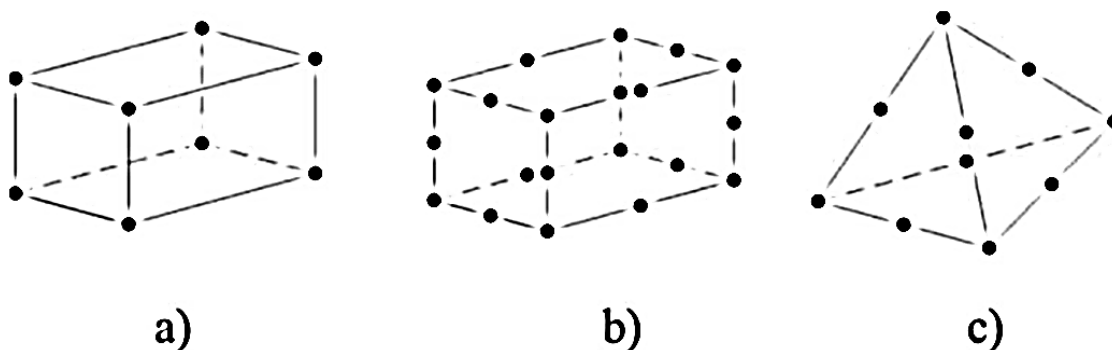


Slika 4 – Vrste elemenata: a) kontinuumski, b) ljuskasti, c) gredni, d) kruti, e) membranski i f) štapni elementi [4]

Stupnjevi slobode konačnih elemenata predstavljaju varijable koje je potrebno izračunati tijekom analize. U općem slučaju su to tri translacijska i tri rotacijska pomaka u čvorovima konačnog elementa kod analize naprezanja i pomaka. Dok kod analize prijenosa topline stupanj slobode predstavlja temperatura u čvoru konačnog elementa. Ukoliko se te dvije

analize spoje, tada su stupnjevi slobode temperatura te translacijski i rotacijski pomaci u čvorovima.

Stupnjevi slobode [4] računaju se u čvorovima konačnog elementa, a do iznosa u nekoj drugoj točki dolazi se interpolacijom. Interpolacija je određena brojem čvorova konačnog elementa i stoga se razlikuju elementi prvog reda, elementi drugog reda i modificirani elementi drugog reda. Elementi prvog reda nazivaju se linearni elementi i sadrže čvorove samo u kutovima elementa i koriste linearnu interpolaciju u svakom smjeru. Kvadratni elementi su elementi drugog reda i imaju čvorove u kutovima elementa te na polovicama njihovih stranica i koriste kvadratnu interpolaciju. Modificirana interpolacija drugog reda koristi se kod modificiranih elemenata drugog reda koji se nazivaju trokutni ili tetraedarski elementi, kod takvih elemenata čvorovi se također nalaze u kutovima i na polovicama stranica konačnog elementa. Na Slici 5 prikazani su različiti elementi s obzirom na broj čvorova i red interpolacije.



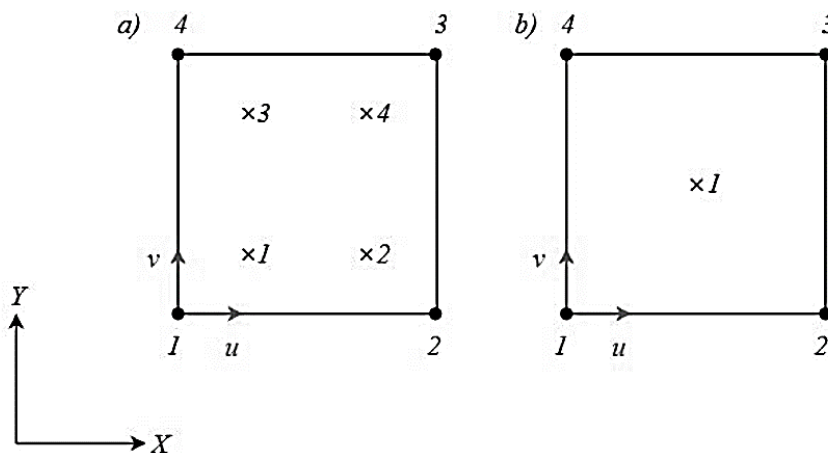
Slika 5 – Konačni elementi s obzirom na broj čvorova i red interpolacije: a) linearni element, b) kvadratni element, c) modificirani element drugog reda [4]

Nadalje, razlikuju se Eulerovi i Lagrangeovi elementi i to prema matematičkoj teoriji korištenoj za definiranje ponašanja elemenata. Eulerovi elementi nepromjenjivi su u vremenu i materijal teče kroz njih te se zato češće koriste u simulacijama strujanja fluida ili kod analize prijenosa topline. S druge strane, Lagrangeovi elementi deformiraju se zajedno s materijalom i prikladni su za analizu postupka kutne ekstruzije.

2.2. Dvodimenzijски konačni elementi

U prvom dijelu numeričke analize u dvodimenzionalnom sustavu, korišteni dvodimenzijски konačni elementi su četverokutni elementi prvog reda s reduciranom integracijom CPS4R. Kratica CPS4R korištena u *Abaqusu* daje dozanja da je riječ o kontinuumskim (C – *Continuum*), dvodimenzijским (PS – *Plane Stress*) elementima s četiri čvora po elementu i koriste reduciranu integraciju (R - *Reduced integration*).

U formulaciji izoparametarskih² elemenata [3], složenost podintegralnih funkcija dolazi do izražaja pa se često primjenjuje numerička integracija. Velik broj točaka integracije za točno izračunavanje matrica krutosti utječe na povećanje troškova za izračunavanje. Stoga se često nastoji smanjiti red numeričke integracije, a da se ne naruši potrebna točnost. Budući da je mreža konačnih elemenata kruća od realne konstrukcije, pomaci dobiveni proračunskim modelom manji su od realnih. Smanjenje točnosti pri izračunavanju matrica može povećati točnost rješenja, tj. smanjenjem točaka integracije smanjena je krutost konstrukcije te je na taj način postojećom mrežom konačnih elemenata omogućeno približavanje točnom rješenju. Numerička integracija s manjim brojem točaka od onog broja koji je potreban za točno izračunavanje matrica krutosti



Slika 6 – Shematski prikaz četverokutnih elemenata: a) CPS4 i b) CPS4R [4]

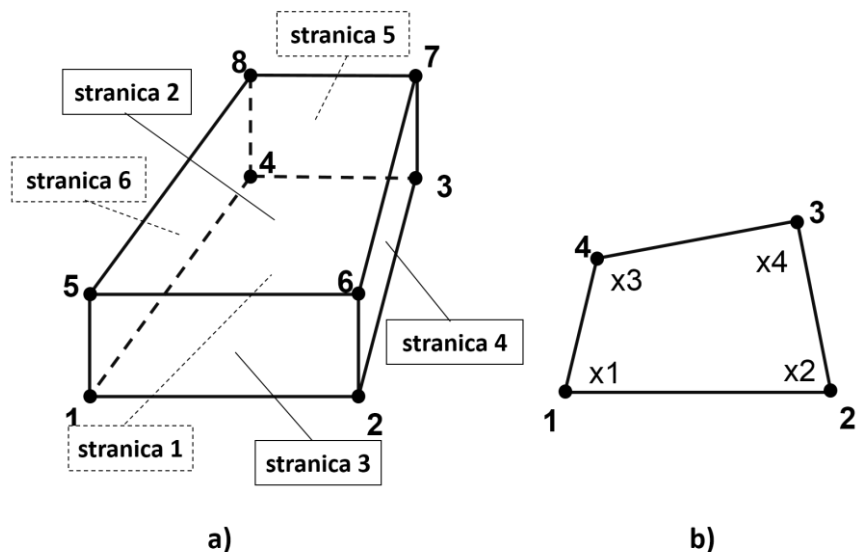
² Nazivaju se izoparametarski jer su interpolacijske funkcije koje opisuju geometriju elemenata jednake funkcijama koje opisuju raspodjelu pomaka po dužini elemenata.

naziva se reducirana integracija. U nekim slučajevima, iako predstavlja uštedu na vremenu, reducirana integracija može dati lošije rezultate od potpune integracije.

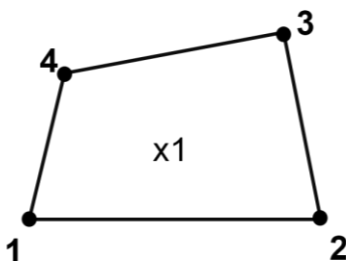
Četverokutni dvodimenzijски elementi prvog reda CPS4R (prikazani na Slici 6) sastoje se od četiri čvora s po dva stupnja slobode u svakom čvoru, a stupnjevi slobode u čvorovima su pomaci u smjeru koordinatnih osi x i y . Ovi konačni elementi opisuju raspodjelu pomaka nepotpunim polinomom drugog stupnja. U slučaju potpune integracije, koriste se dvije točke integracije u oba smjera, dok se kod reducirane integracije koristi samo jedna točka, koja se nalazi u težištu elementa.

2.3. Trodimenzijski konačni elementi

U drugom dijelu rada provedena je numerička analiza u trodimenzionalnom sustavu te su u sklopu te simulacije korišteni trodimenzijski, heksaedarski konačni elementi prvog reda. Oznaka tih elemenata u *Abaqusu* je C3D8R, što označava da su to kontinuumski, trodimenzijski elementi s osam čvorova po elementu. Takvi elementi u svakom čvoru imaju po tri stupnja slobode, točnije, tri translacijska pomaka. Ovi elementi koriste Lagrangeovu formulaciju te reduciranu integraciju. U točkama integracije izračunavaju se nepoznate veličine te se nakon toga iznos veličina u ostalim točkama računa interpolacijom. Na Slici 7 prikazan je C3D8 element te položaj točaka integracije na jednoj od stranica elementa s potpunom dok Slika 8 prikazuje element s reduciranom integracijom.



Slika 7 – a) C3D8 element, b) Točke integracije C3D8 [4]



Slika 8 – Točka integracije C3D8R elementa [4]

3. NUMERIČKA ANALIZA KUTNE EKSTRUZIJE

3.1. Svojstva aluminija

U ovoj numeričkoj analizi materijal uzorka koji se ispituje je „komercijalno čisti“ aluminij Al99,5. Zbog niske specifične gustoće (posebno u odnosu na željezo) i dobrih fizikalnih svojstava, aluminij i aluminijske legure imaju široku primjenu u: automobilske, zrakoplovnoj i prehrambenoj industriji te brodogradnji. Iz tog razloga često se koristi u različitim ispitivanjima i pronalaze se načini za dodatno poboljšanje njegovih svojstava. U Tablici 2 prikazan je kemijski sastav, dok Tablica 3 prikazuje mehanička i fizikalna svojstva čistog aluminija potrebna kao ulazni podaci za ovu analizu.

Tablica 2 – Maseni udio elemenata u „komercijalno čistom“ aluminiju Al99,5 [5]

"Komercijalno čisti" aluminij Al99,5 - Kemijski sastav (maseni udio, %)						
Aluminij	Željezo	Silicij	Bakar	Cink	Titan	Ostali
99,5	< 0,35	< 0.12	< 0,02	< 0.04	< 0.015	< 0.02

Tablica 3 – Mehanička i fizikalna svojstva „komercijalno čistog“ aluminija Al99,5 [6]

"Komercijalno čisti" aluminij Al99,5 - Mehanička i fizikalna svojstva				
Vlačna čvrstoća [MPa]	Granica razvlačenja [MPa]	Youngov modul elastičnosti [MPa]	Poissonov koeficijent	Gustoća [g/cm ³]
160	145	69 000	0,33	2,71

3.1.1. Krivulja tečenja aluminija

Krivulja tečenja materijala bitan je ulazni podatak za provedbu analize deformacije materijala metodom konačnih elemenata. Korištena je krivulja tečenja za čisti aluminij iz atlasa krivulja tečenja [7], a iščitani iznosi naprezanja plastičnog tečenja i logaritamskog stupnja deformacije prikazani su u Tablici 4. Podaci su iščitani iz krivulje dobivene pri sobnoj temperaturi uz brzinu deformacije u iznosu od $0,25 \text{ s}^{-1}$.

Tablica 4 – Prikaz vrijednosti iščitanih iz krivulje tečenja čistog aluminija

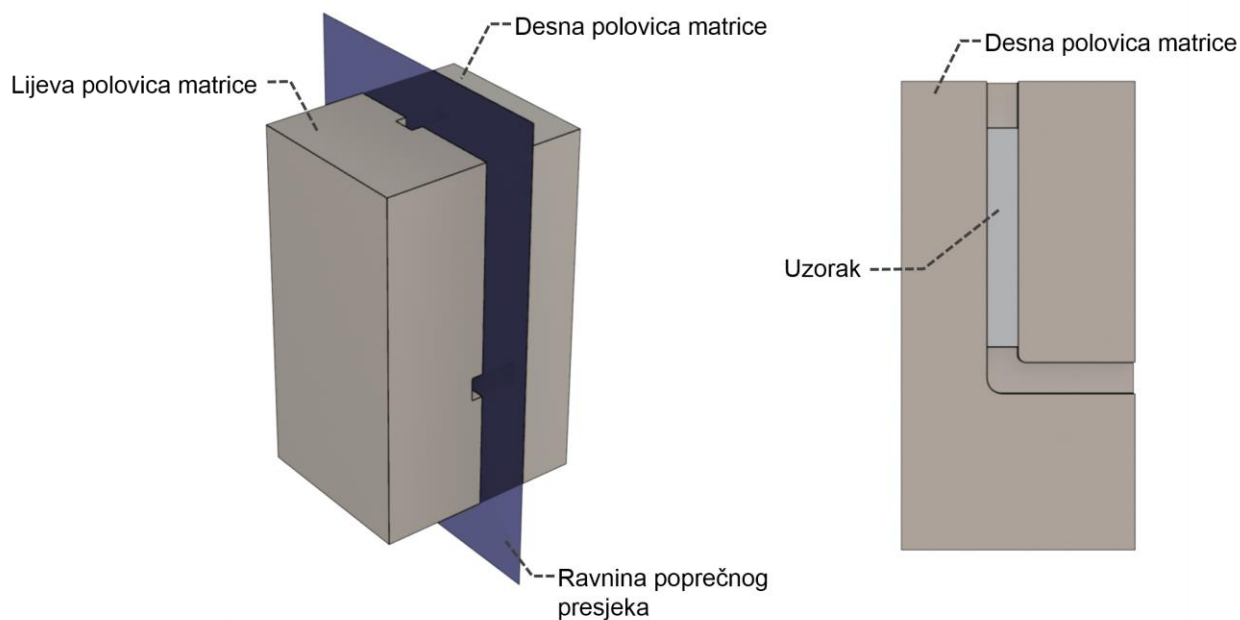
Naprežanje plastičnog tečenja, σ [MPa]	Logaritamski stupanj deformacije, ϵ
55,16	0,00
103,43	0,20
124,11	0,40
137,90	0,60
151,69	0,80
179,27	1,00
193,06	1,20
206,85	1,40
234,43	1,60
262,01	1,80
275,80	2,00

3.2. Dvodimenzionalna simulacija kutne ekstruzije

Dvodimenzionalna analiza kutne ekstruzije aluminijskog uzorka čije su dimenzije 20 mm x 140 mm provedena je u programskom paketu *Abaqus* u uvjetima izotermne ravninske deformacije. Utjecaj trenja nije uzet u obzir, a analizirana je prva faza procesa, odnosno prvi prolazak uzorka kroz matricu i to za više slučajeva s različitim kutovima između ulaznog i izlaznog kanala matrice:

- 1) $\phi = 90^\circ$,
- 2) $\phi = 110^\circ$,
- 3) $\phi = 125^\circ$ i
- 4) $\phi = 135^\circ$.

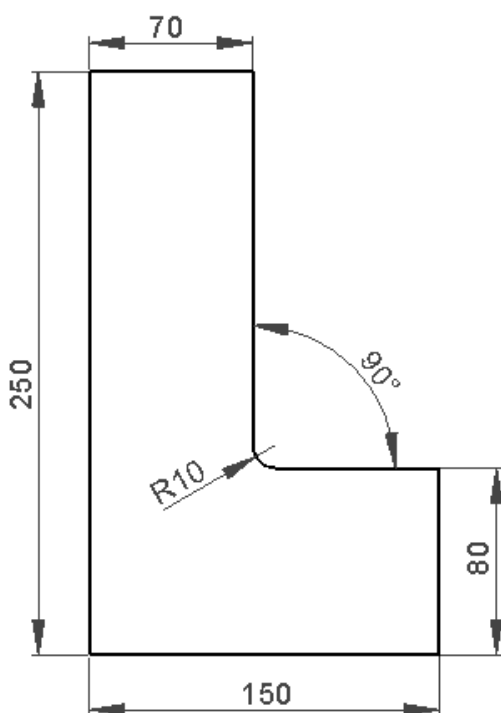
Analiza je provedena u poprečnom presjeku između lijeve i desne polovice matrice. Ravnina poprečnog presjeka u trodimenzionalnom prostoru prikazana je na lijevoj strani Slike 9., dok je na desnoj strani slike prikazan sam poprečni presjek.



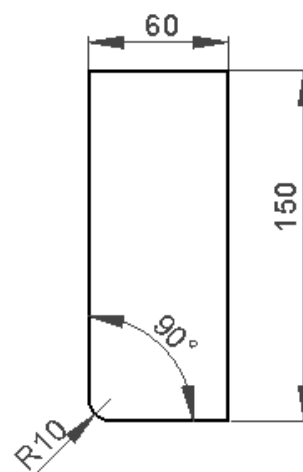
Slika 9 – Prikaz ravnine poprečnog presjeka u kojemu se analizira 2D simulacija

1. slučaj $\Phi = 90^\circ$

Za početak numeričke analize potrebno je odrediti dimenzije svih prisutnih dijelova, njihova svojstva i rubne uvjete koji definiraju odvijanje kutne ekstruzije. Kako se u ovome dijelu rada analizira dvodimenzionalni model procesa i to u poprečnom presjeku prikazanom na Slici 9, potrebno je modelirati ukupno četiri dijela. Prvi dio, vanjski dio matrice³ prikazan je na Slici 10 (lijevo) zajedno s pripadajućim dimenzijama.



Vanjski dio matrice



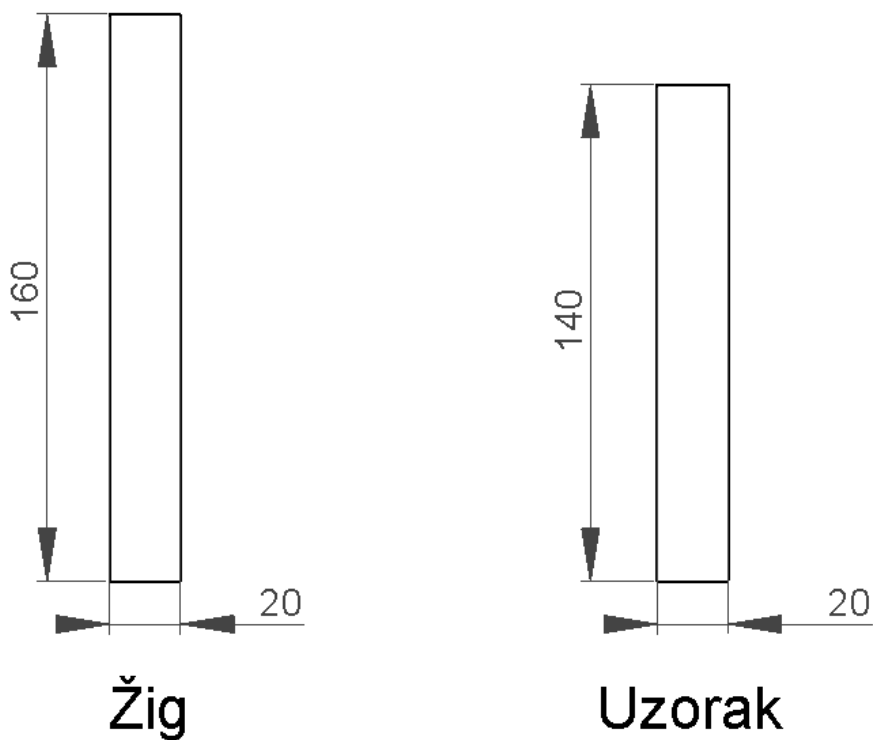
Unutarnji dio matrice

Slika 10 – Dimenzije matrice – 1. slučaj

Drugi dio, unutarnji dio matrice³ prikazan je na Slici 10 (desno) zajedno s pripadajućim dimenzijama. Bitno je napomenuti da u realnosti ova dva dijela čine cjelinu, odnosno jednu polovicu matrice. Nadalje, na Slici 10 vidljiv je radijus od 10 mm na spoju kanala koji je postavljen radi jednostavnijeg provođenja analize. Time je kut na vanjskom dijelu spoja

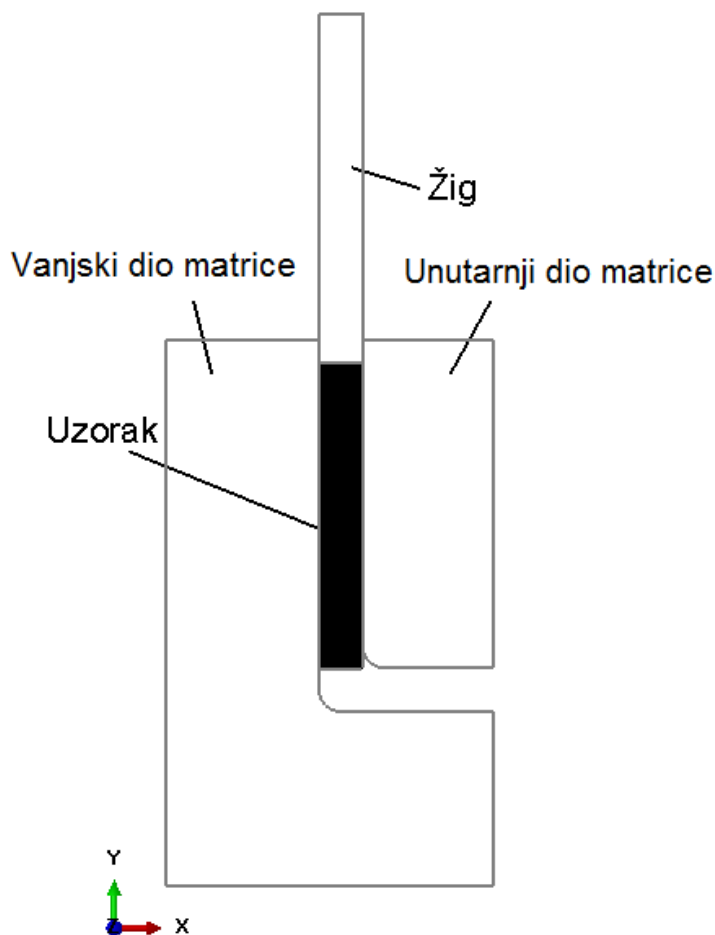
³ U realnosti ne postoje unutarnji i vanjski dio matrice, već dvije bočne polovice matrice koju su simetrične u odnosu na ravninu poprečnog presjeka u kojoj se provodi ova analiza. Međutim, zbog lakšeg snalaženja u ovome dijelu rada se koriste termini unutarnji i vanjski dio matrice.

kanala, ψ postavljen na iznos od $36,9^\circ$ što prema dokazu u Tablici 1 nema značajan utjecaj na krajnju deformaciju materijala. Također, dijelovi matrice modelirani su kao idealna kruta tijela jer su u izrađeni od materijala čvršćeg od obrađivanog uzorka i njihovo ponašanje u ovoj analizi nije bitno. Idući dio koji je potrebno modelirati je žig kojim se protiskuje uzorak, prikazan lijevo na Slici 11. Jednako kao i obje matrice, žig predstavlja idealno kruto tijelo u ovoj analizi. Posljednji dio koji je potrebno dodati u analizu je obrađivani materijal, odnosno uzorak. Dimenzije uzorka prikazane su na desnoj strani Slike 11. Uzorak se, za razliku od ostalih dijelova, modelira kao deformabilno tijelo jer se analizira njegovo ponašanje tijekom procesa.



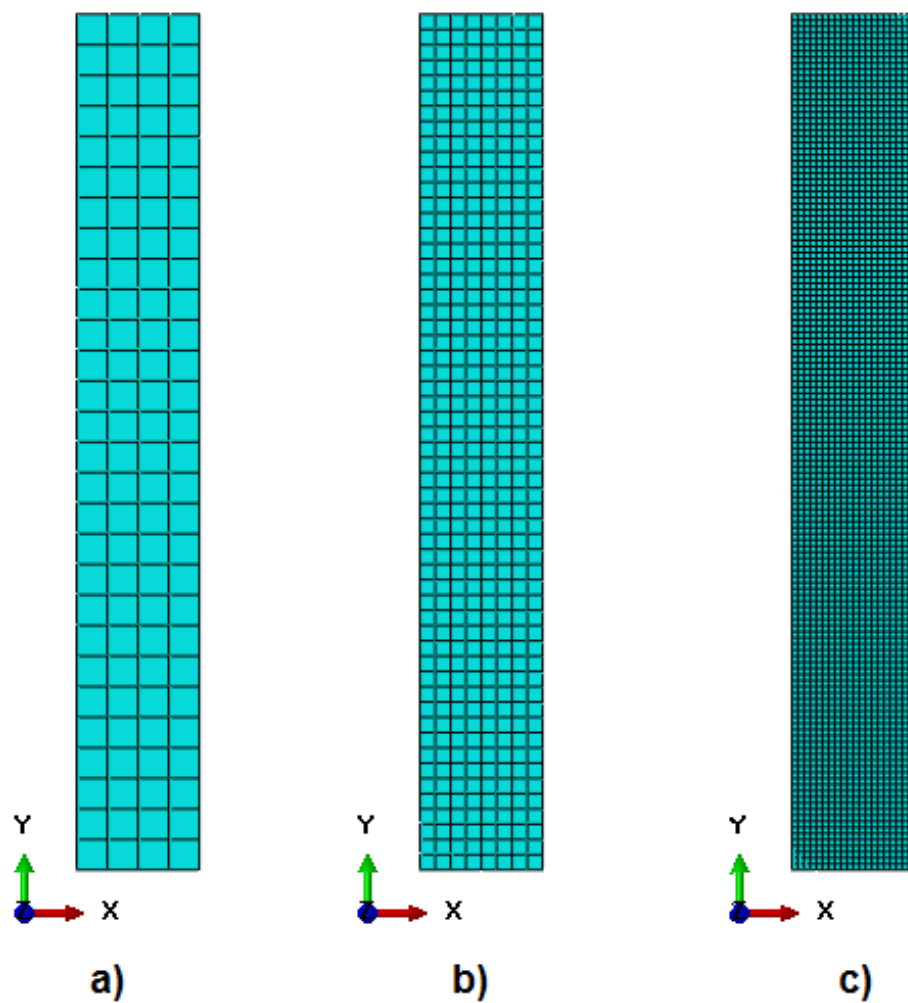
Slika 11 – Dimenzije žiga i uzorka – 1. slučaj

Slika 12 prikazuje sklop svih dijelova i njihovu početnu poziciju. Matrica se tijekom procesa ne pomiče, dok uzorak pod tlačnim djelovanjem žiga prolazi kroz kanale matrice i deformira se sve do trenutka kada ponovno postigne svoj prvobitni oblik, odnosno žig napravi hod od 140 mm.



Slika 12 – Sklop svih dijelova – 1. slučaj

Idući korak analize je definiranje svojstava materijala koja su prikazana u Tablicama 3 i 4. Nadalje, potrebno je definirati konačne elemente prikladne za rješavanje ovoga problema. Odabrani su četverokutni elementi prvog reda s reduciranom integracijom - CPS4R. Osim vrste konačnih elemenata, određuje se i njihov broj na modeliranim dijelovima. Veći broj konačnih elemenata daje točniji rezultat, no povećava vrijeme potrebno za računanje. Iz tog razloga je potrebno odrediti takav broj konačnih elemenata koji ne narušava točnost rezultata, ali omogućuje da se analiza provede u prihvatljivom vremenu. Nakon nekoliko pokušaja provedbe analize, odlučeno je da broj konačnih elemenata na uzorku iznosi 448, na žigu 360, na unutarnjem 416 te 796 na vanjskom dijelu matrice. Na Slici 13 prikazana su tri slučaja s različitim brojem konačnih elemenata na uzorku, odabran je slučaj b).

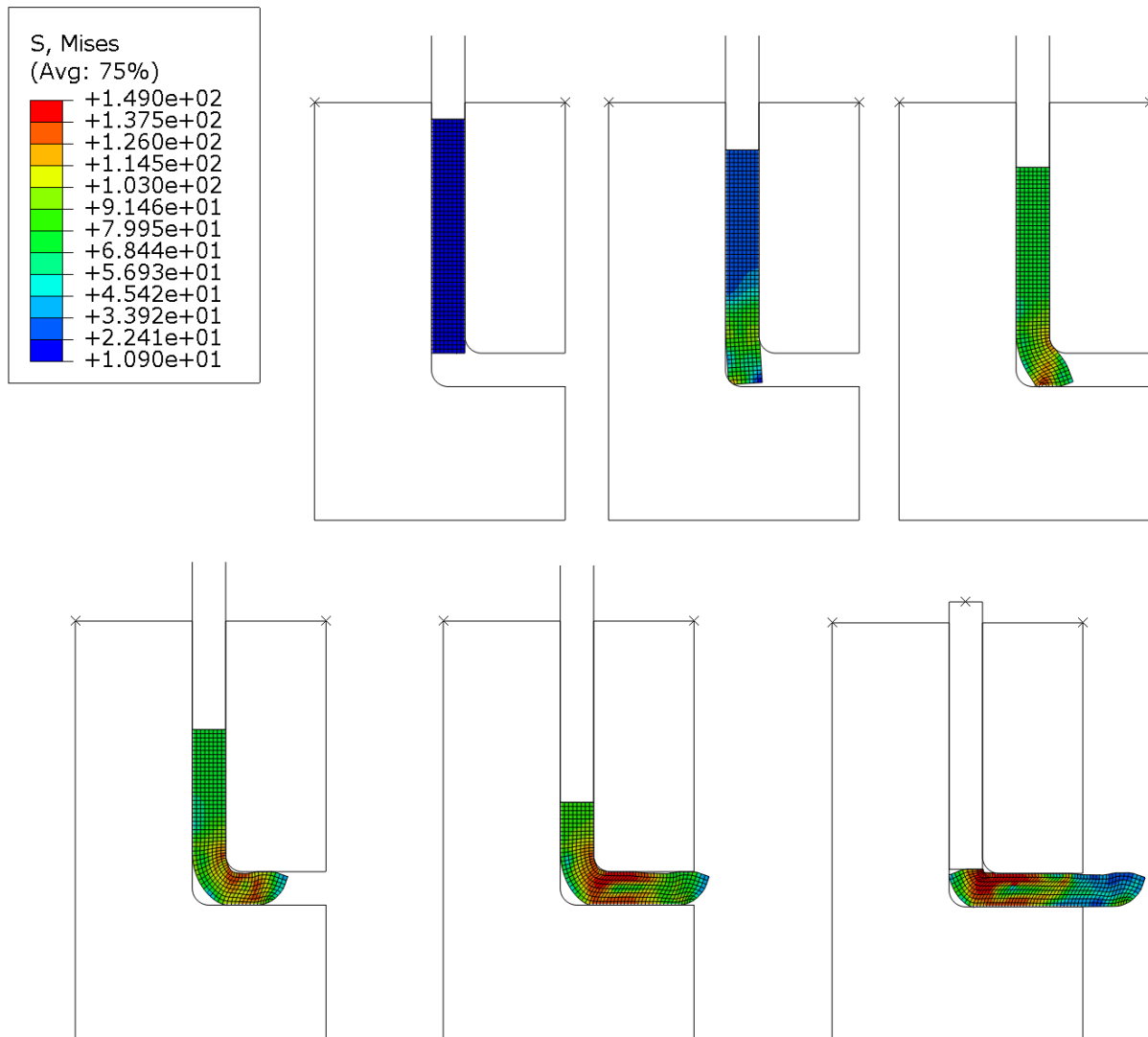


Slika 13 – Uzorak s različitim brojem konačnih elemenata

- a) 112 konačnih elemenata
- b) 448 konačnih elemenata
- c) 2800 konačnih elemenata

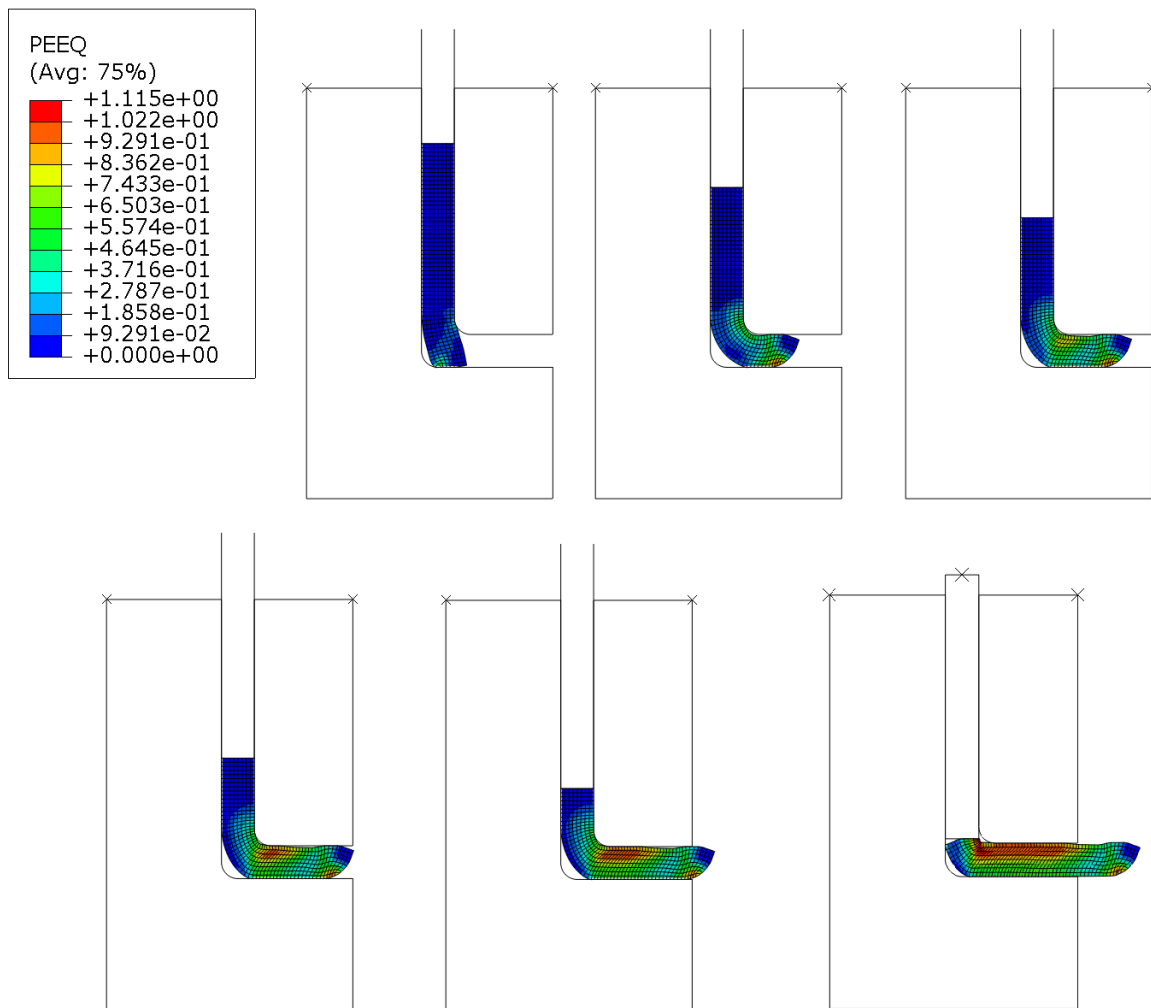
1. slučaj – rezultati

Na Slici 14 prikazani su rezultati prvog slučaja s kutom između ulaznog i izlaznog kanala od 90° , točnije, prikazana je raspodjela naprezanja uzorka po von Misesu.



Slika 14 – Naprezanja po von Misesu – 1. slučaj

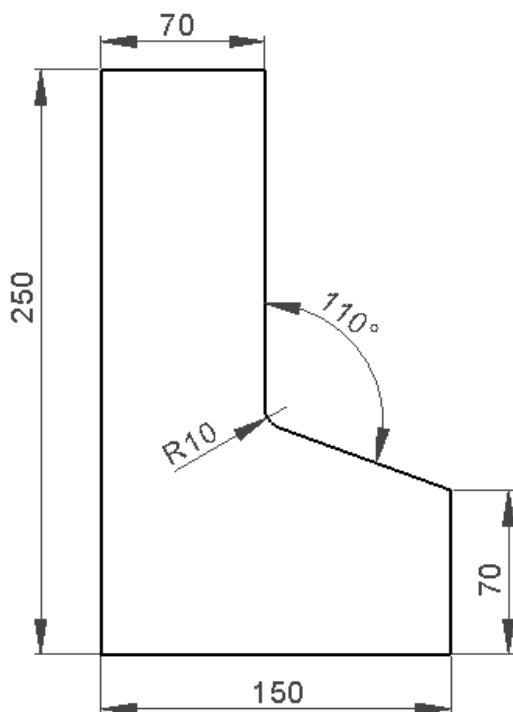
Slika 15 prikazuje raspodjelu ekvivalentnih plastičnih deformacija kojima je prilikom prolaska kroz kanal između matrica, podvrgnut aluminijski uzorak.



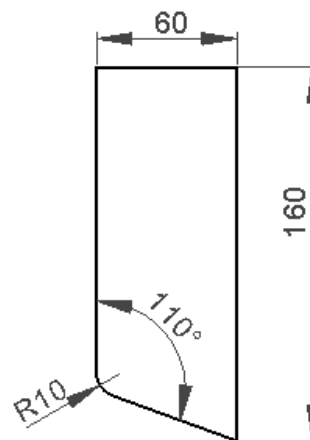
Slika 15 – Ekvivalentna plastična deformacija – 1. slučaj

2. slučaj $\Phi = 110^\circ$

Jednako kao i u prvom slučaju, analiza se započinje definiranjem geometrije svih dijelova koji sudjeluju u procesu. Kako se u radu istražuje utjecaj konstrukcije alata, odnosno kuta između kanala matrice na uzorak, jasno je da se dimenzije i oblik uzorka i žiga ne mijenjaju. S druge strane, matricu je potrebno modelirati na način da sada kut između ulaznog i izlaznog kanala iznosi 110° . Unutarnji dio matrice (desno) i vanjski dio matrice (lijevo) s kutom od 110° prikazani su na Slici 16. Žig i matrica ponovno predstavljaju idealna kruta tijela dok je uzorak modeliran kao deformabilno tijelo. Radijus od 10 mm na spoju ulaznog i izlaznog kanala matrice u ovome slučaju (zbog promjene kuta Φ) će postaviti kut ψ na iznos od $31,4^\circ$, što opet predstavlja zanemariv utjecaj na krajnji rezultat.



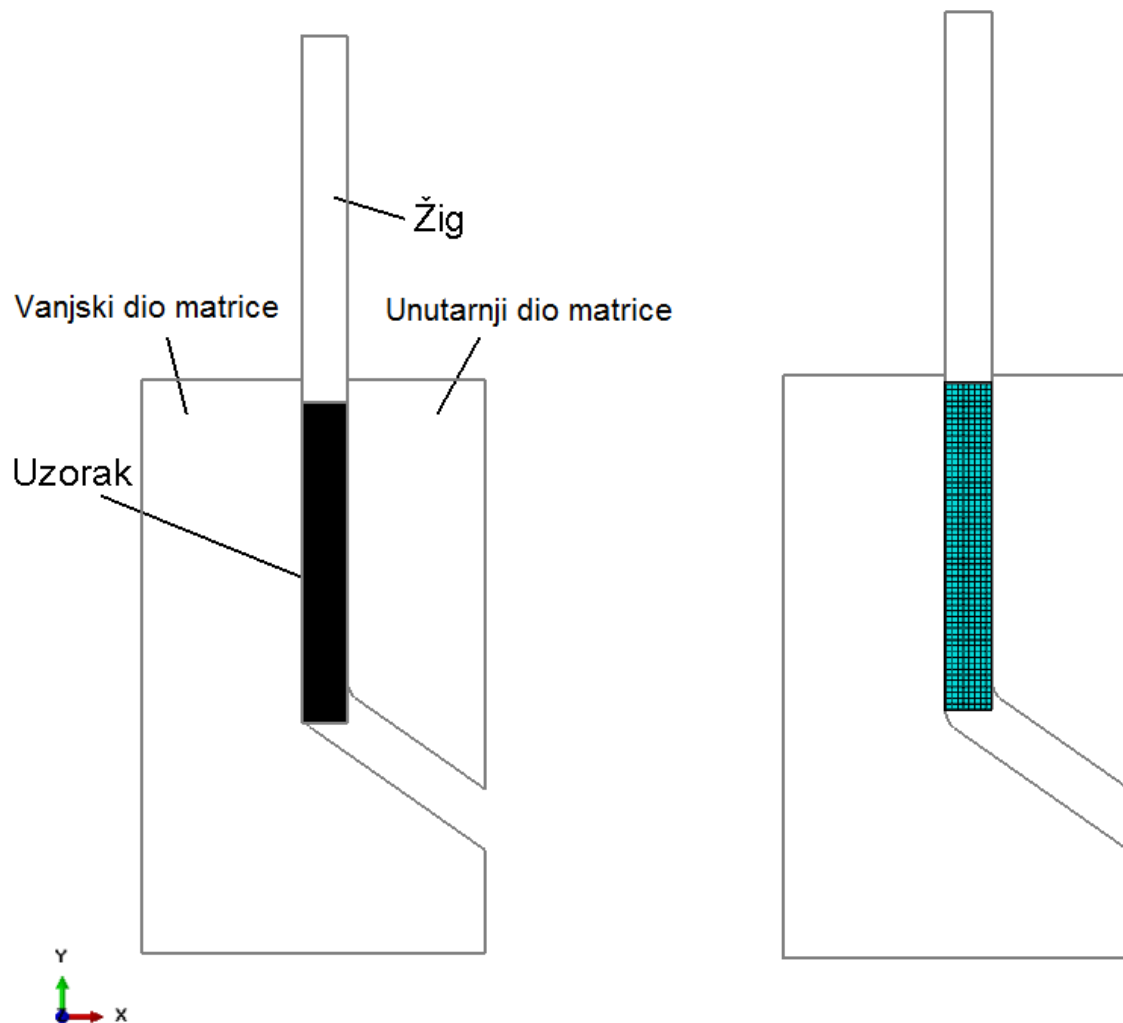
Vanjski dio matrice



Unutarnji dio matrice

Slika 16 – Dimenzije matrice – 2. slučaj

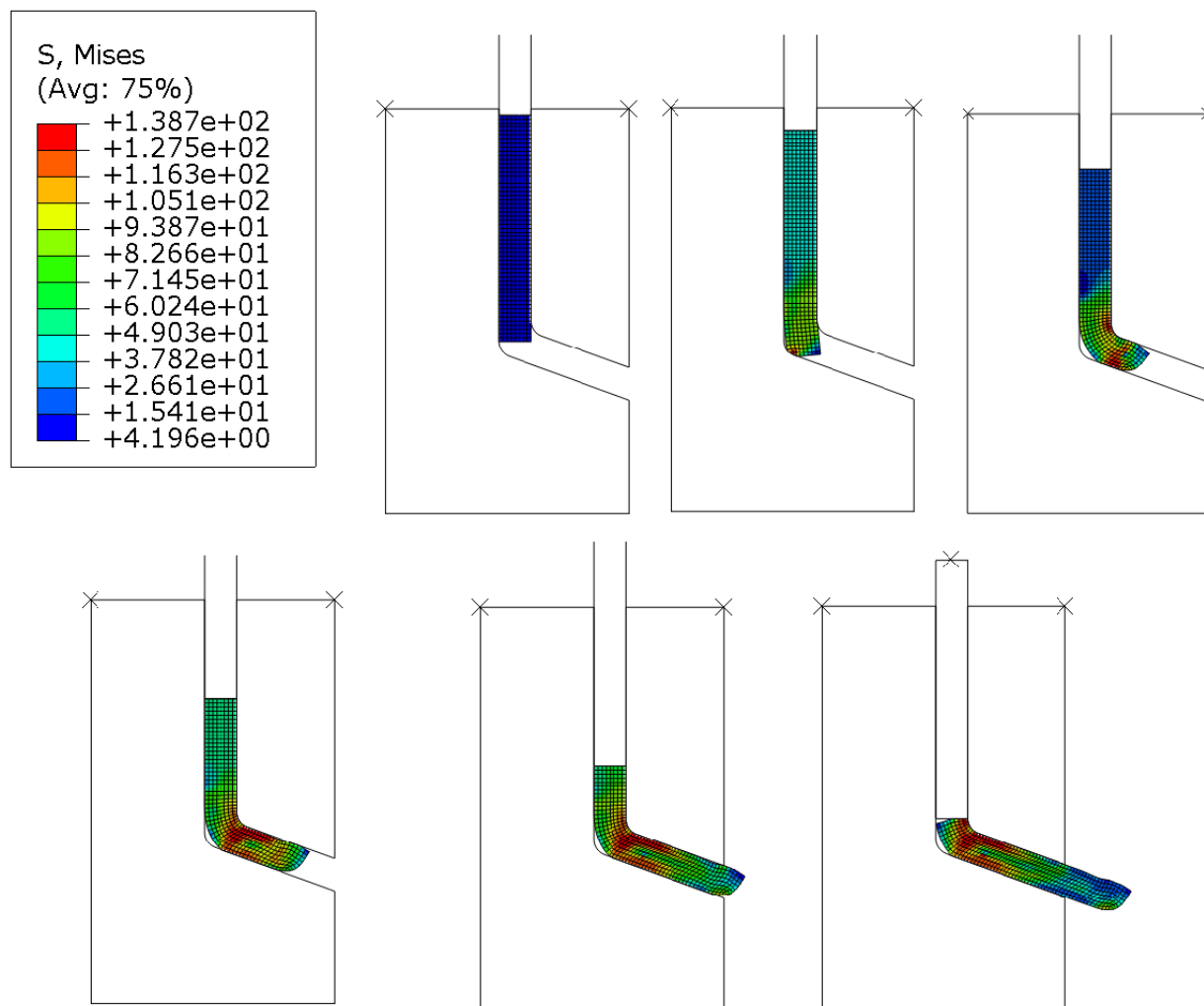
Slika 17 prikazuje sklop svih dijelova i njihov položaj na početku procesa. Na desnoj strani slike prikazani su i konačni elementi na uzorku čiji broj ponovno iznosi 448.



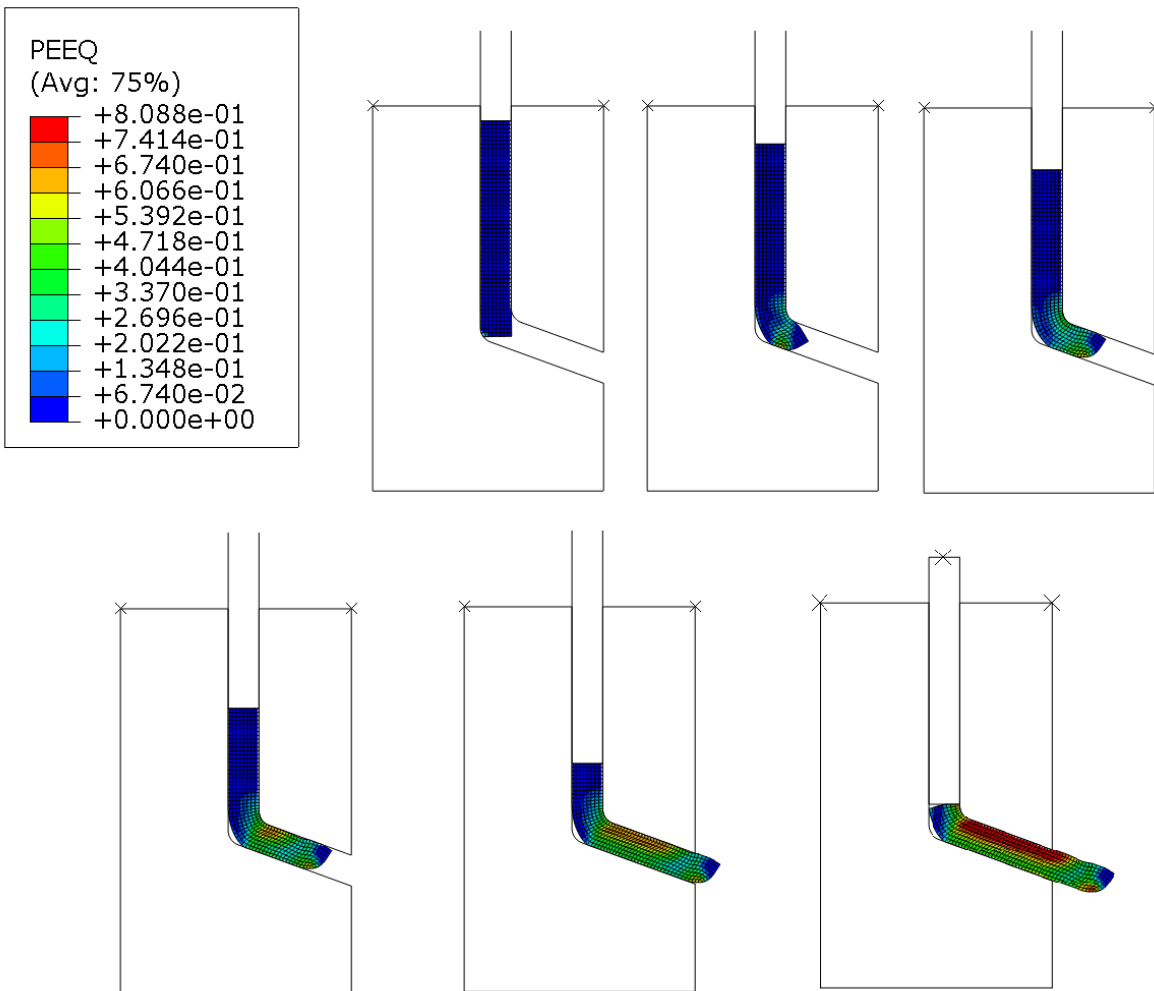
Slika 17 – Sklop svih dijelova i prikaz konačnih elemenata na uzorku – 2. slučaj

2. slučaj – rezultati

Iz izraza (1) jednostavnim računom dokazuje se da s porastom kuta između ulaznog i izlaznog kanala matrice (Φ), materijal koji se obrađuje doživljava manju deformaciju. Stoga se kao rezultat ovog slučaja očekuje manji iznos deformacije. Rezultati dobiveni analizom slučaja s kutom Φ u iznosu od 110° prikazani su na Slikama 18 i 19.



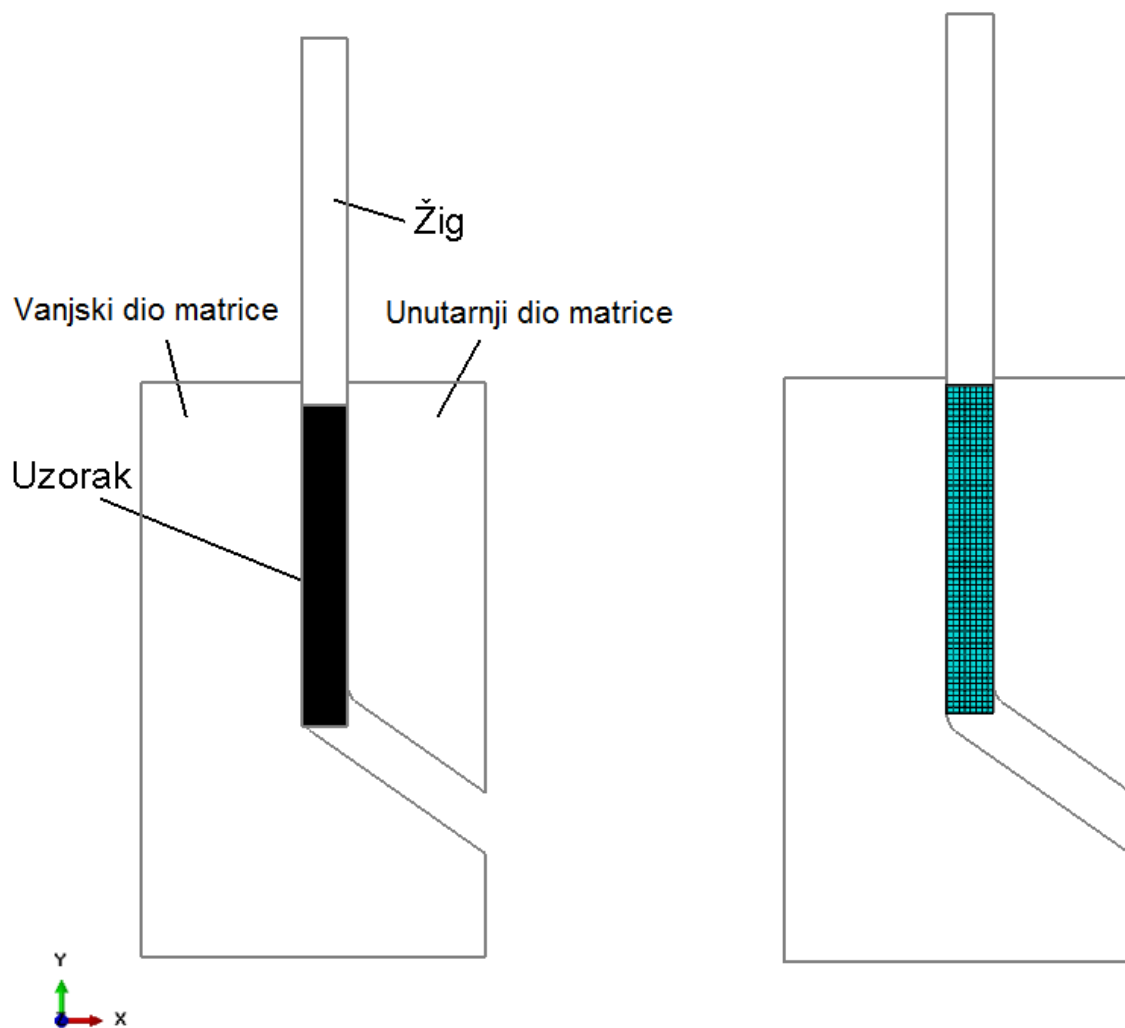
Slika 18 – Naprezanja po von Misesu – 2. slučaj



Slika 19 – Ekvivalentna plastična deformacija – 2. slučaj

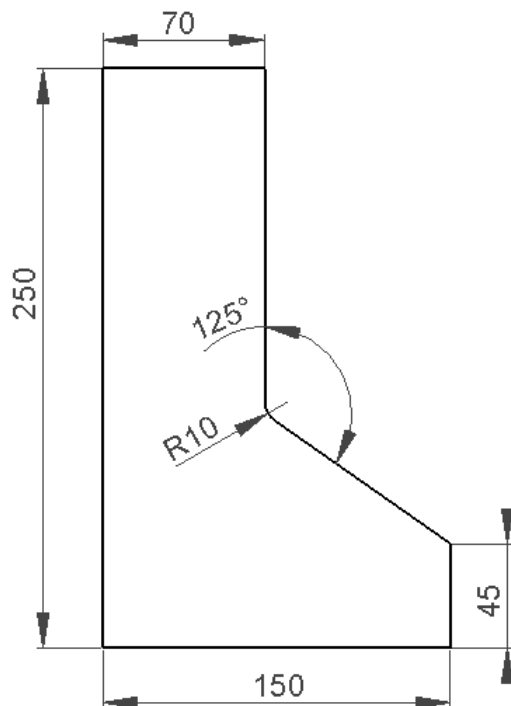
3. slučaj $\Phi = 125^\circ$

Na Slici 20 prikazan je sklop dijelova i njihov početni položaj te konačni elementi za slučaj s kutom između kanala u iznosu od 125° .

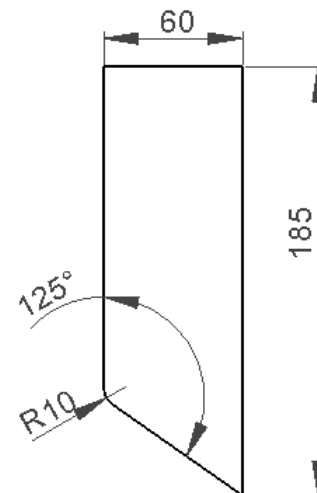


Slika 20 – Sklop svih dijelova i prikaz konačnih elemenata – 3. slučaj

Na Slici 21 prikazane su dimenzije unutarnjeg i vanjskog dijela matrice. U ovom slučaju radijus od 10 mm na spoju kanala matrice postaviti će kut ψ na iznos od $25,8^\circ$.



Vanjski dio matrice

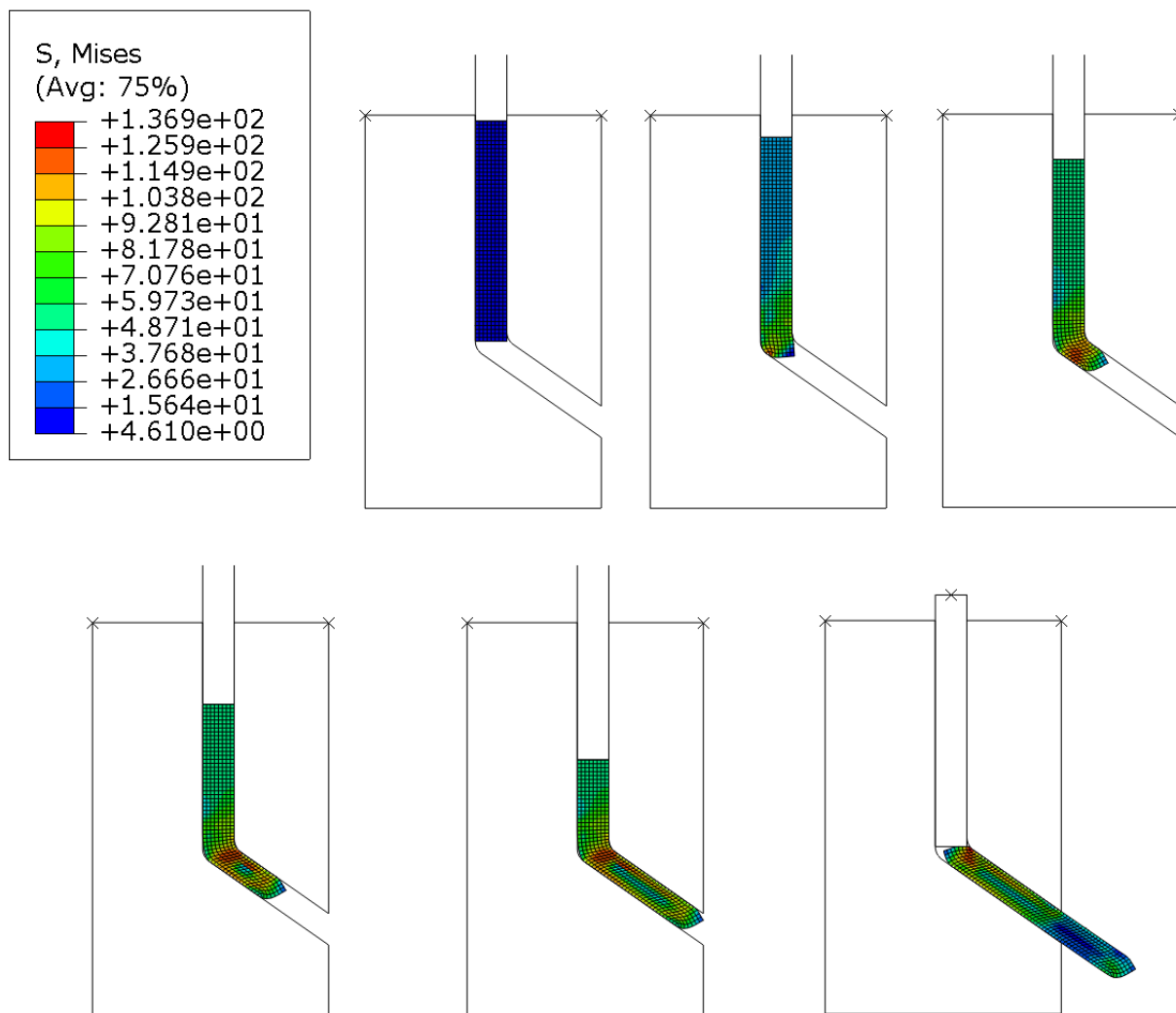


Unutarnji dio matrice

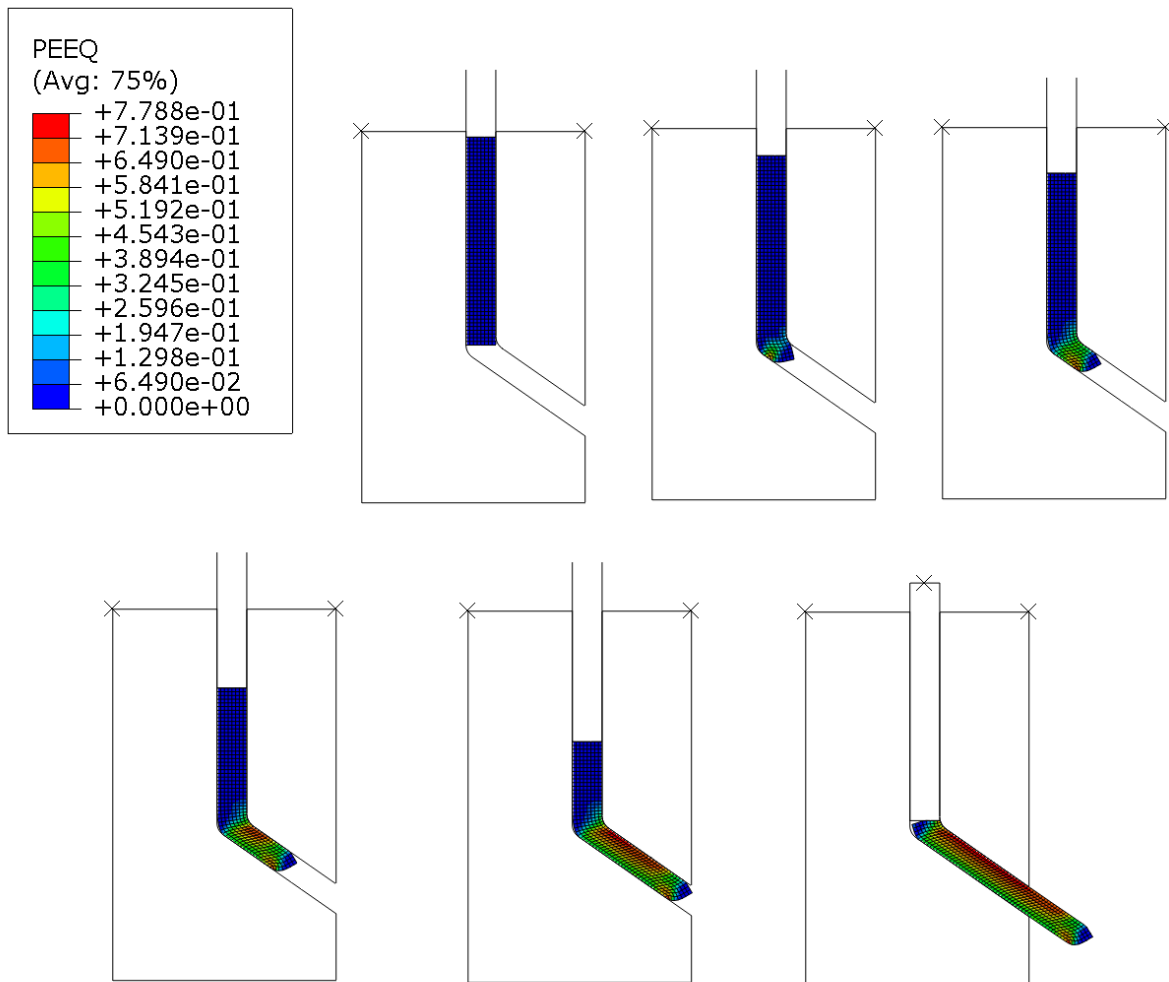
Slika 21 – Dimenzije matrice – 3. slučaj

3. slučaj – rezultati

Prema očekivanju, povećanjem kuta između ulaznog i izlaznog kanala dolazi do manje deformacije na aluminijskom uzorku što je vidljivo u rezultatima numeričke analize prikazanim na Slikama 22 i 23.



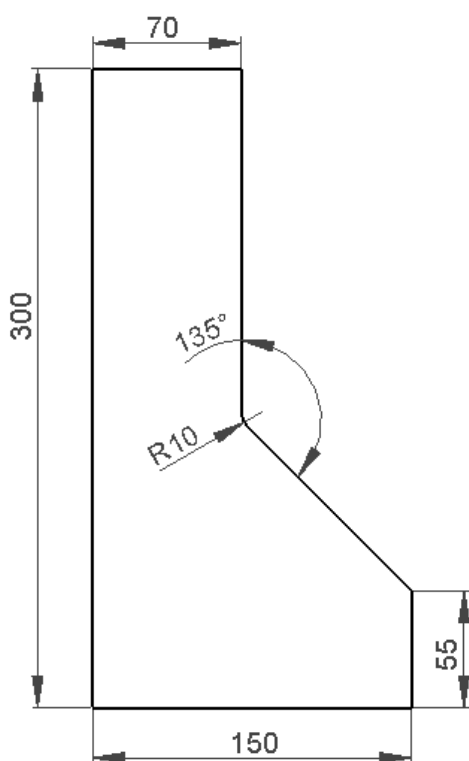
Slika 22 – Naprezanja po von Misesu – 3. slučaj



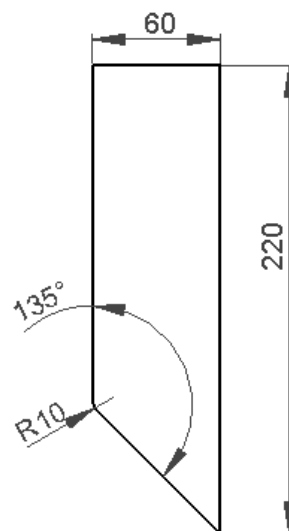
Slika 23 – Ekvivalentna plastična deformacija – 3. slučaj

4. slučaj $\Phi = 135^\circ$

Kao posljednji slučaj u dvodimenzionalnom sustavu, provedena je analiza procesa kutne ekstruzije s kutom između ulaznog i izlaznog kanala u iznosu od 135° . Takva konstrukcija matrice koristi se u slučajevima obrade materijala velike čvrstoće kod kojih je izrazito teško provesti proces s manjim kutovima između kanala. Međutim, s obzirom da se obrađeni materijal nakon provedbe procesa kutne ekstruzije vraća u prvobitni oblik, moguće je provesti više faza ekstruzije čime se čak i kod jako čvrstih materijala mogu postići značajni rezultati. Na Slici 24 prikazane su dimenzije matrice, kut Ψ u ovome slučaju iznosi $21,6^\circ$.



Vanjski dio matrice

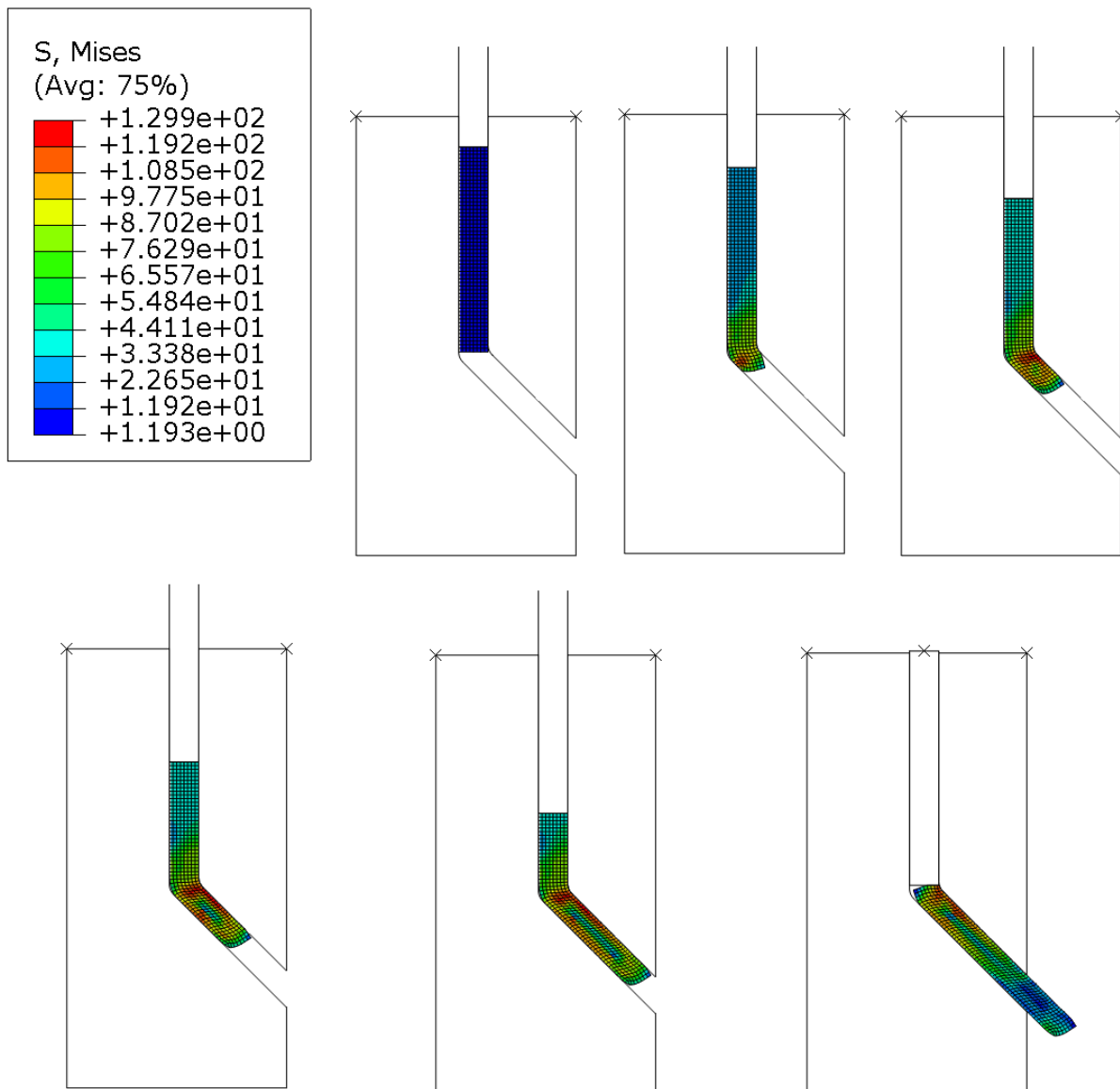


Unutarnji dio matrice

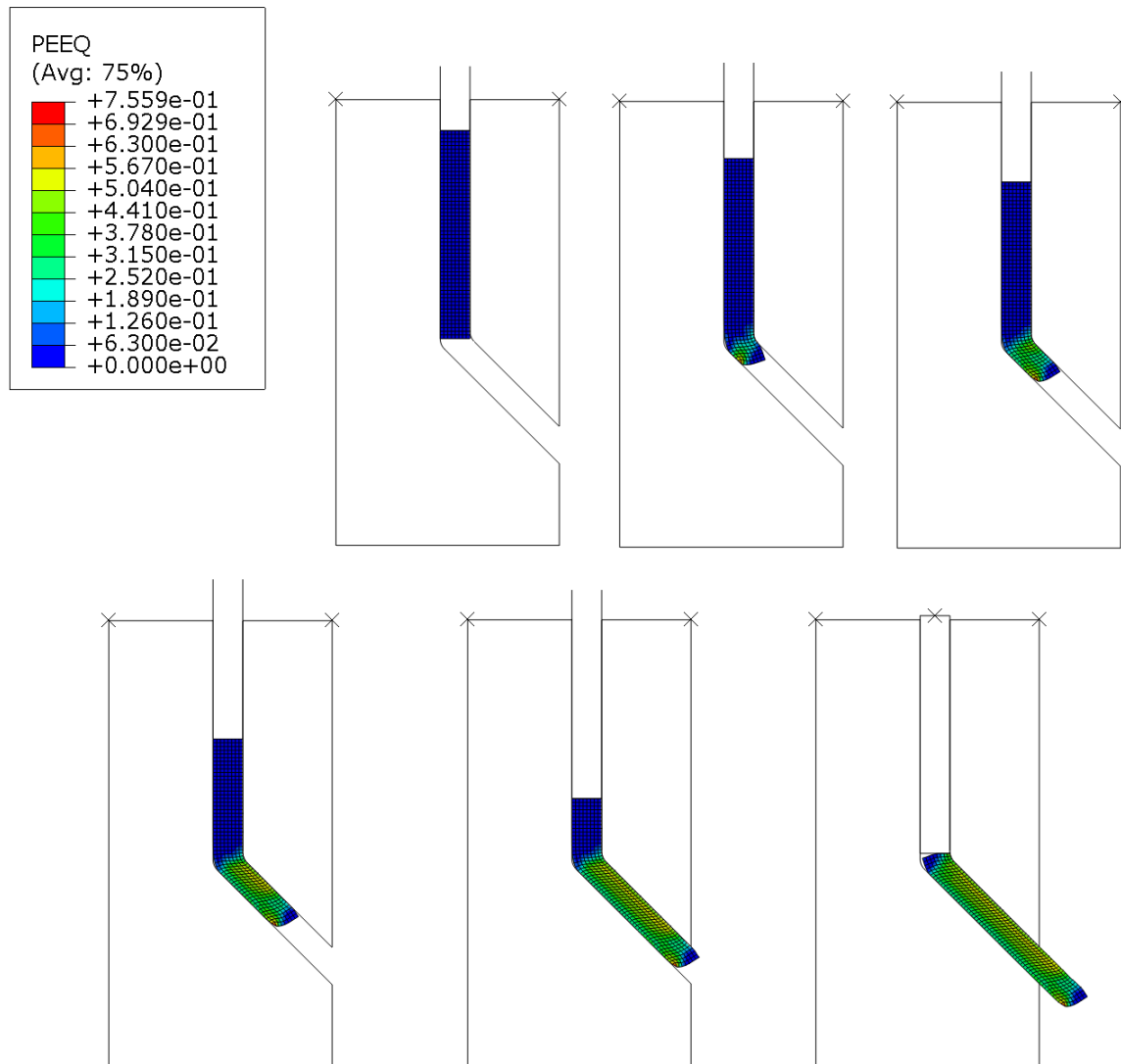
Slika 24 – Dimenzije matrice – 4. slučaj

4. slučaj – rezultati

Iz Slika 25 i 26 jasno je vidljivo da je u slučaju s kutom između kanala matrice od 135° došlo do najmanjih deformacija i naprezanja u usporedbi sa svim ostalim slučajevima.



Slika 25 – Naprezanja po von Misesu – 4. slučaj

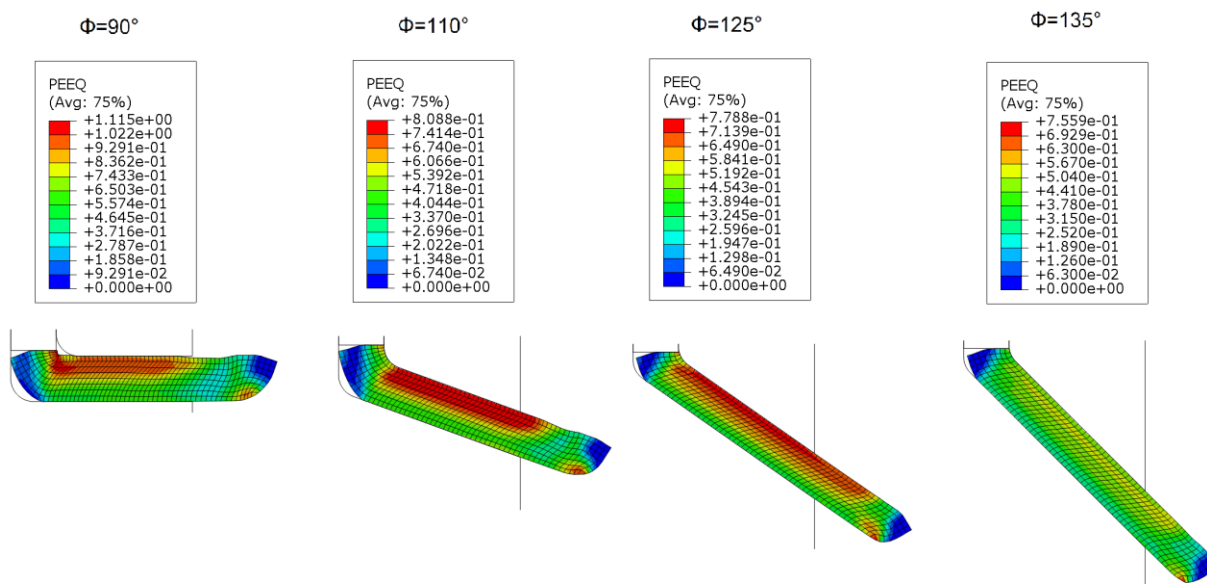


Slika 26 – Ekvivalentna plastična deformacija – 4. slučaj

3.3. Zaključak dvodimenzionalne numeričke analize

U dosadašnjem dijelu rada, dvodimenzionalnom numeričkom analizom dokazana je ovisnost deformacije i naprezanja o samoj konstrukciji alata za kutnu ekstruziju. Točnije, kut između ulaznog i izlaznog kanala matrice (Φ) ima najveći utjecaj na deformacije koje će se postići na obrađivanom uzorku. Metodom konačnih elemenata analizirana su četiri različita slučaja obrade uzorka od čistog aluminija u ovisnosti o kutu Φ (90° , 110° , 125° i 135°). Rezultati prikazani na prethodnim slikama analize pokazuju da taj kut utječe ne samo na intenzitet, već i na distribuciju deformacija nastalih u obrađivanom materijalu.

Na Slici 27 prikazana je usporedba konačnih oblika uzoraka te nastalih deformacija u materijalu nakon simulacije obrade u svakom od četiriju različitih konstrukcija alata, odnosno matrica.



Slika 27 – Usporedba konačnih stanja uzoraka nakon dvodimenzionalnih simulacija

Iz slike se na temelju boja deformiranih konačnih elemenata i legendi iznad uzoraka, jasno može potvrditi činjenica da s povećanjem kuta između kanala matrice, pada intenzitet deformacija postignutih u materijalu. U realnom svijetu, to bi značilo da će se u materijalu koji je obrađen alatom s manjim kutom između kanala matrice, postići finija kristalna struktura, a samim time i bolja mehanička svojstva. S druge strane, povećanje kuta Φ direktno znači da će plastična deformacija kojoj je podvrgnut materijal biti manja, samim

time kristalna struktura biti će sačinjena od malo većih kristalnih zrna (u odnosu na slučaj s manjim kutom Φ), ali još uvijek manjih u odnosu na početno stanje. Što znači da će u tom slučaju materijal na poslijetku imati nešto bolja mehanička svojstva, no ne onoliko koliko bi to bilo u slučaju s manjim kutom između ulaznog i izlaznog kanala matrice. Logično je onda postaviti pitanje – čemu uopće alati s kutom Φ većim od 90° ? Odgovor na to pitanje leži u širokom spektru materijala koji se mogu obrađivati postupkom kutne ekstruzije. Čisti aluminij ili bakar imaju prilično nisku granicu razvlačenja i bez problema se mogu plastično deformirati i obraditi kutnom ekstruzijom u alatu s kutom Φ od 90° . Kada bi se neki čvršći materijali, kao što su neke titanove legure, ekstrudirali hidrauličnom prešom kroz alat za kutnu ekstruziju s kutom Φ od 90° , vrlo vjerojatno bi došlo do prevelikog naprezanja alata. Obzirom da je alat najčešće izrađen od alatnog čelika, ukoliko se takva obrada ne bi na vrijeme zaustavila, došlo bi do plastične deformacije ili loma samog alata, što nikako nije željeni cilj. Stoga se takvi materijali podvrgavaju pritiskanju kroz alat čiji je kut između ulaznog i izlaznog kanala veći od 90° jer se na taj način, kao što je dokazano u ovome radu, postižu manja naprezanja i deformacije kako u materijalu tako i na samom alatu.

Velika prednost postupka kutne ekstruzije je to što poprečni presjek obratka ostaje nepromijenjen nakon obrade, stoga je otvorena mogućnost ponavljanja procesa u više faza, odnosno prolaza, na istom obratku. Na taj način se može postići vrlo visoka ukupna deformacija čak i kod jako čvrstih materijala.

Nadalje, rezultati analize pokazuju kako distribucija nastalih deformacija u materijalu nikako nije jednolika. Iz Slike 27, posebno u prva tri slučaja, može se primijetiti kako su deformacije puno veće pri gornjem rubu uzorka. Što bi značilo da uzorak obrađen samo jednim prolazom kutne ekstruzije ne posjeduje svojstvo izotropije⁴. Kako bi se materijal približio izotropnom stanju, postupak se ponavlja u više faza, ali uz rotaciju obratka oko uzdužne osi nakon svake faze procesa. U zaključku ustanovljenom nakon trodimenzionalne analize, detaljnije je objašnjen značaj rotacije obratka između svake faze te na koje načine se rotacija može izvoditi.

⁴ Izotropija je osobina materijala da u svim smjerovima i u svakoj točki tijela posjeduje jednaka fizikalna i mehanička svojstva.

3.4. *Trodimenzijska analiza kutne ekstruzije*

U nastavku rada provedena je simulacija procesa kutne ekstruzije u trodimenzijskom svijetu. Kako dvodimenzijska analiza ne predstavlja realni model i lošije simulira realno ponašanje materijala tijekom samog deformiranja, potrebno je radi postizanja što preciznijih i što točnijih rezultata provesti analizu u trodimenzijskom svijetu. Naime, i sama definicija postupaka značajne plastične deformacije govori da su materijali podvrgnuti takvim tehnikama, istovremeno pod utjecajem velike smične deformacije i **troosnog** tlačnog naprezanja. Iz tog razloga, vrlo je bitno dodati i treću dimenziju u samu simulaciju postupka kutne ekstruzije.

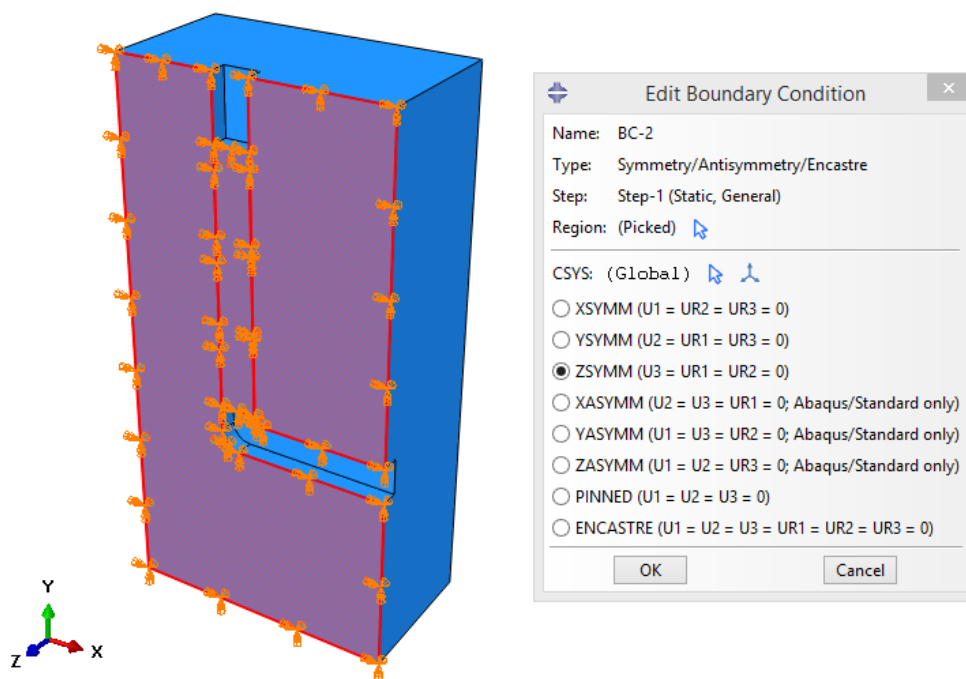
Kao i u već provedenoj dvodimenzijskoj analizi, u ovome dijelu je metodom konačnih elemenata i uz pomoć programskog paketa *Abaqus*, ispitano ponašanje uzorka od čistog aluminija tijekom prve faze procesa kutne ekstruzije. Svojstva materijala potrebna za analizu ponovno su ista ona iz Tablice 3, a podaci iščitani iz krivulje tečenja su oni prikazani u Tablici 4. Nadalje, utjecaj temperature i trenja nije uzet u obzir. Međutim, kao i u dvodimenzijskoj analizi, analizirane su četiri različite konstrukcije alata u ovisnosti o kutu između ulaznog i izlaznog kanala matrice i to za slijedeće iznose:

- 5) $\phi = 90^\circ$,
- 6) $\phi = 110^\circ$,
- 7) $\phi = 125^\circ$ i
- 8) $\phi = 135^\circ$.

Bitno je napomenuti da se način modeliranja samog alata u ovoj analizi razlikuje od onoga u prvom dijelu rada, odnosno dvodimenzijskoj analizi. U tom dijelu rada analiza se provodila u poprečnom presjeku alata i cjelokupni model je bio sastavljen od slijedećih dijelova: žig, uzorak, vanjski dio matrice i unutarnji dio matrice. Već je prethodno objašnjeno da se matrica u realnosti ne sastoji od vanjskog i unutarnjeg dijela. Sada se proučava realan, trodimenzijski slučaj procesa kutne ekstruzije i alat se sastoji od lijeve i desne polovice matrice, koje su simetrične oko ravnine u kojoj se provodila dvodimenzijska analiza.

Nadalje, modeliranje procesa u ovome dijelu rada pojednostavljeno je uz nekoliko pretpostavki koje ne narušavaju točnost rezultata, već samo skraćuju vrijeme potrebno za provedbu numeričke analize.

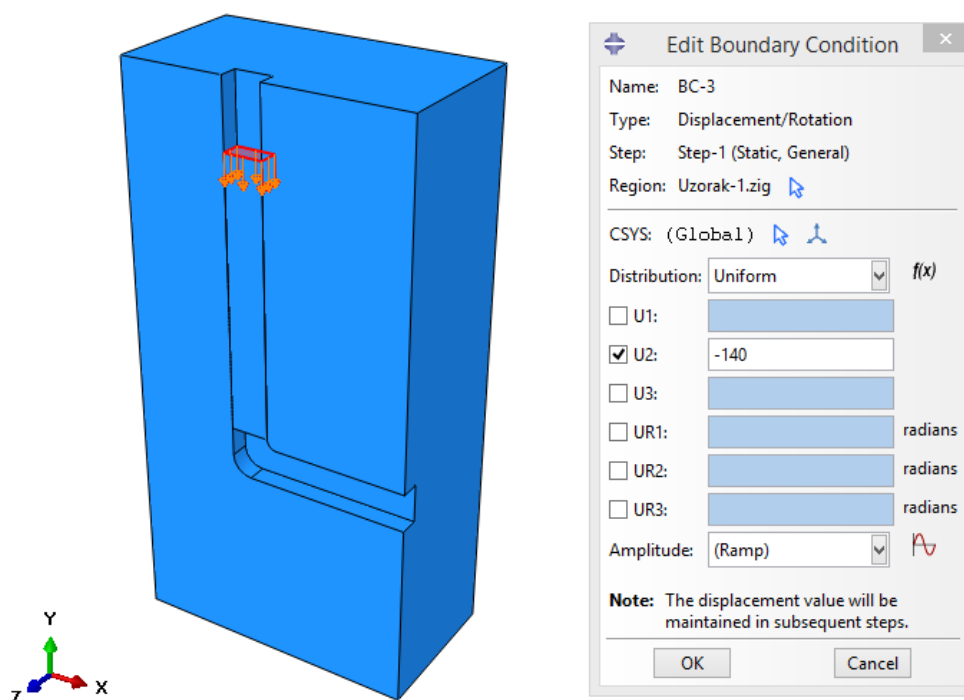
Prvo, s obzirom da su cijeli alat i sam uzorak simetrični oko ravnine u kojoj se provodila dvodimenzionalna analiza, iskorištena je mogućnost postavljanja rubnog uvjeta simetrije oko te ravnine. Na taj način se u diskretizaciji modela znatno smanjuje broj konačnih elemenata. Što direktno znači da je i broj nepoznanica u algebarskom sustavu jednadžbi manji, a time se na poslijetku osigurava značajna ušteda vremena potrebnog za rješavanje analize, uz nepromijenjene krajnje rezultate. Na Slici 28 prikazan je postavljeni rubni uvjet simetrije oko ravnine XY na modeliranoj konstrukciji koja se sastoji od jedne polovice matrice i polovice uzorka.



Slika 28 – Rubni uvjet simetrije cijelog modela oko ravnine XY

Druga pretpostavka koja pojednostavljuje izvođenje trodimenzionalne analize povezana je sa samim žigom kojim se obradak protiskuje kroz matricu. Funkcija žiga krucijalna je i bez njega je postupak kutne ekstruzije (u realnom svijetu) nemoguće provesti. Općenito, cilj ekstruzije je da se materijal deformira po cijeloj svojoj duljini. Stoga, duljina žiga, odnosno pomak ili hod koji žig mora napraviti tijekom obrade, mora iznositi najmanje

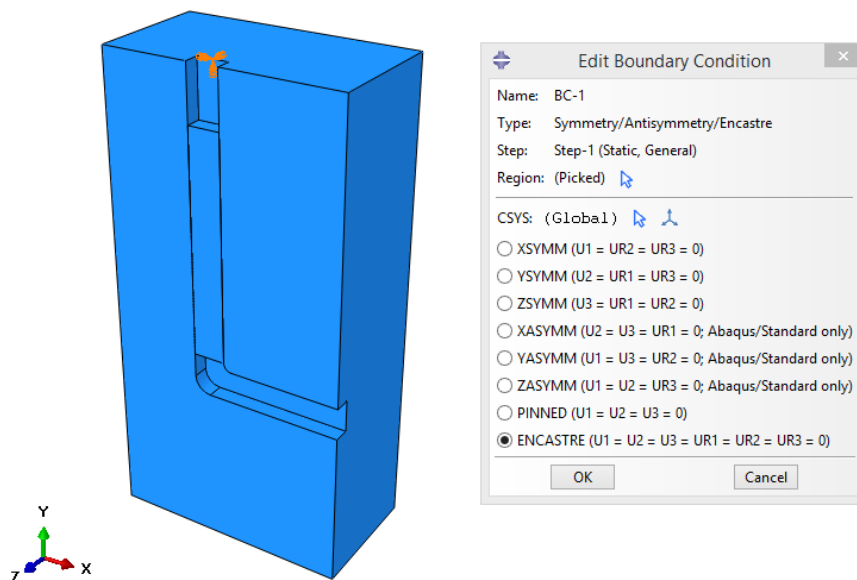
onoliko koliko iznosi najveća dimenzija obratka – duljina. U provedenoj dvodimenzionalnoj analizi modelirana su sva tri ključna sudionika procesa kutne ekstruzije: matrica, žig i uzorak. Matrica i žig modelirani su kao idealna kruta tijela jer ne doživljavaju značajnije deformacije u samom procesu niti je njihovo ponašanje tijekom obrade cilj ove analize. S druge strane, uzorak je modeliran kao deformabilno tijelo jer se istražuje njegovo ponašanje i krajnje stanje. U prethodno analizi, žig duljine 160mm pritiskao je uzorak duljine 140mm kroz kanale matrice. Rubni uvjet pomaka po osi Y od -140mm bio je postavljen na sami žig te je na taj način uzorak bio pritiskan kroz matricu cijelom svojom duljinom. Međutim, radi dodatnog pojednostavljenja trodimenzionalne analize, žig je u potpunosti izbačen i umjesto na njega, rubni uvjet pomaka od -140 mm po osi Y postavljen je na gornju površinu (vidljivu na Slici 29) uzorka dugog 140 mm. Ovo pojednostavljenje je dozvoljeno i ne utječe na analizu nikako drugačije osim olakšavanjem samog modeliranja u kojem je sada broj dijelova manji.



Slika 29 – Rubni uvjet pomaka uzorka za 140mm u negativnom smjeru osi Y

Razlog koji dozvoljava izbacivanje žiga iz analize leži u površini u kojoj se dodiruju žig i uzorak. Na toj dodirnoj površini žig pritišće i pomiče uzorak za 140 mm. Ukoliko se promatra promjena oblika uzorka i pomak svake njegove točke tijekom procesa, može se zaključiti da se jedino na toj površini nalaze točke koje se pomaknu samo vertikalno za 140mm u cijelom procesu. Skoro sve ostale točke uzorka pomiču se vertikalno sve dok ne krenu prelaziti iz ulaznog kanala matrice u izlazni, gdje se kreću pomicati i po horizontalnoj, X osi. Dodirna površina uzorka i žiga ne dolazi do izlaznog kanala i pomiče se samo vertikalno, jednako kao i sam žig, pa je radi pojednostavljenja rubni uvjet pomaka postavljen na površinu uzorka.

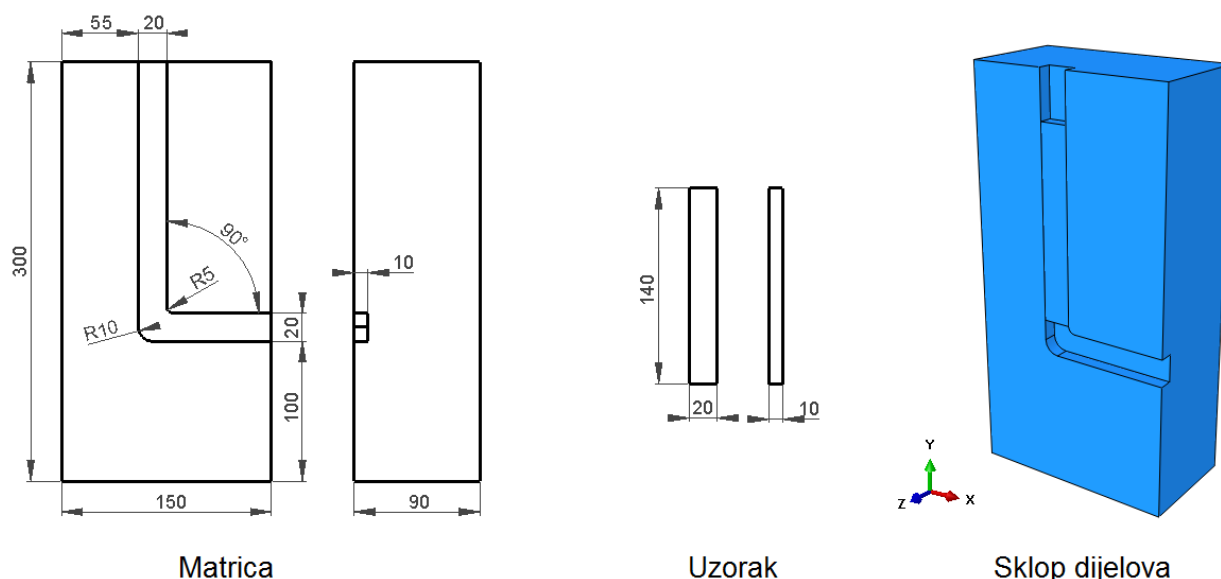
Kao što je već i spomenuto, ove pretpostavke vrijede u analizi svakog od četiriju slučajeva trodimenzionalne simulacije i prikazani načini postavljanja rubnih uvjeta također su jednaki u svakom od njih. Kako bi rubni uvjeti u cijelosti bili definirani, bitno je napomenuti da je osim simetrije cijelog modela oko osi XY te pomaka uzorka po osi Y, u svim slučajevima postavljen i rubni uvjet uklještenja (eng. *Encastre*). Matrica se tijekom procesa kutne ekstruzije ne pomiče niti rotira te je iz tog razloga na njoj potrebno definirati rubni uvjet uklještenja. Kako je matrica modelirana kao idealno kruto tijelo, dovoljno je postaviti uklještenje u bilo koju točku koja je dio matrice i na taj način se niti jedan drugi dio ne može pomicati niti rotirati.



Slika 30 – Rubni uvjet uklještenja u točki matrice

5. slučaj $\Phi = 90^\circ$

Numerička analiza započinje određivanjem dimenzija i konstruiranjem svih dijelova prisutnih u analizi. Iz već objašnjenih razloga, u slijedećih četiri slučaja sudionici analize su samo jedna polovica matrice i jedna polovica uzorka. Matrica se ponovno modelira kao idealno kruto tijelo, a uzorak kao deformabilno tijelo. Prvi od četiri slučajeve trodimenzionalne analize proveden je s matricom čiji kut između ulaznog i izlaznog kanala iznosi $\Phi = 90^\circ$. Dimenzije i sklop svih dijelova prikazani su na Slici 31.

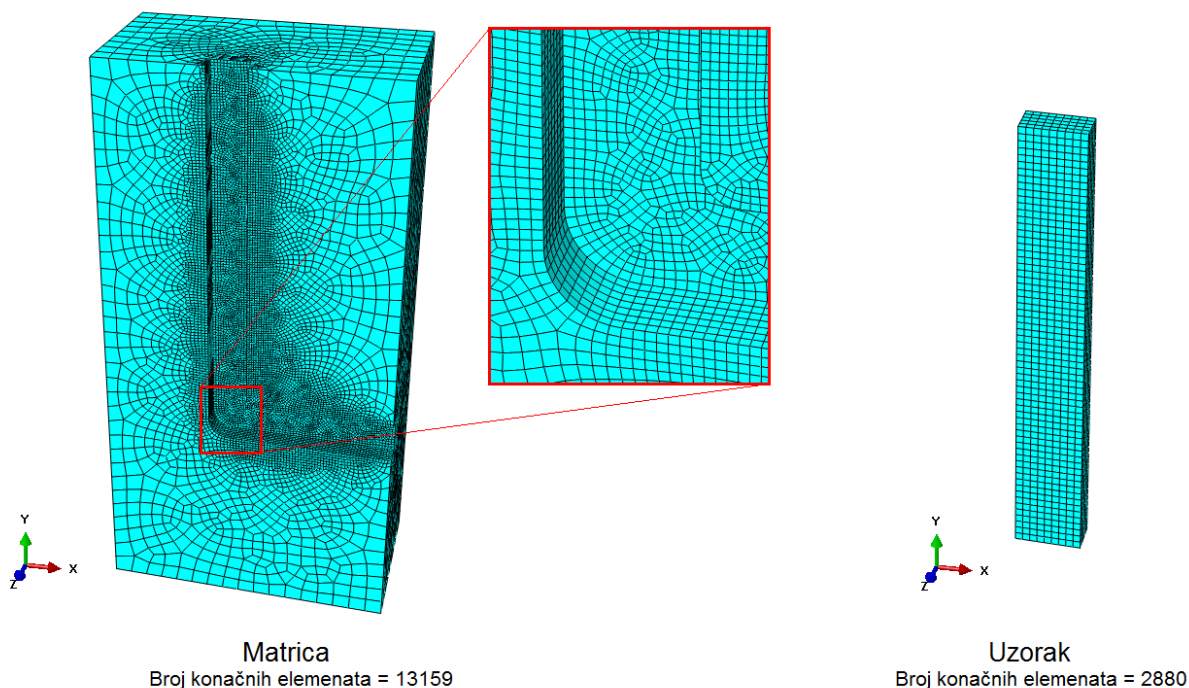


Slika 31 – Dimenzije i sklop matrice i uzorka – 5. slučaj

Nadalje, potrebno je definirati svojstva materijala svih deformabilnih dijelova, ovdje je to samo uzorak. Informacije o materijalu potrebne za uspješno provođenje analize su slijedeće: Youngov modul elastičnosti, Poissonov koeficijent te gustoća. Ove informacije prikazane su u Tablici 3 na početku rada. Također su potrebni podaci o međusobnom odnosu naprezanja plastičnog tečenja i logaritamskog stupnja deformacije. Ti podaci iščitani su iz krivulje tečenja i prikazani u Tablici 4.

Idući korak prije pokretanja simulacije je definiranje konačnih elemenata. Za ovu analizu odabrani su trodimenzijski, heksaedarski konačni elementi prvog reda koji koriste Lagrangeovu formulaciju i reduciranu integraciju - C3D8R. Nakon toga, potrebno je odrediti broj konačnih elemenata na smislen način. Općenito vrijedi tvrdnja da veći broj

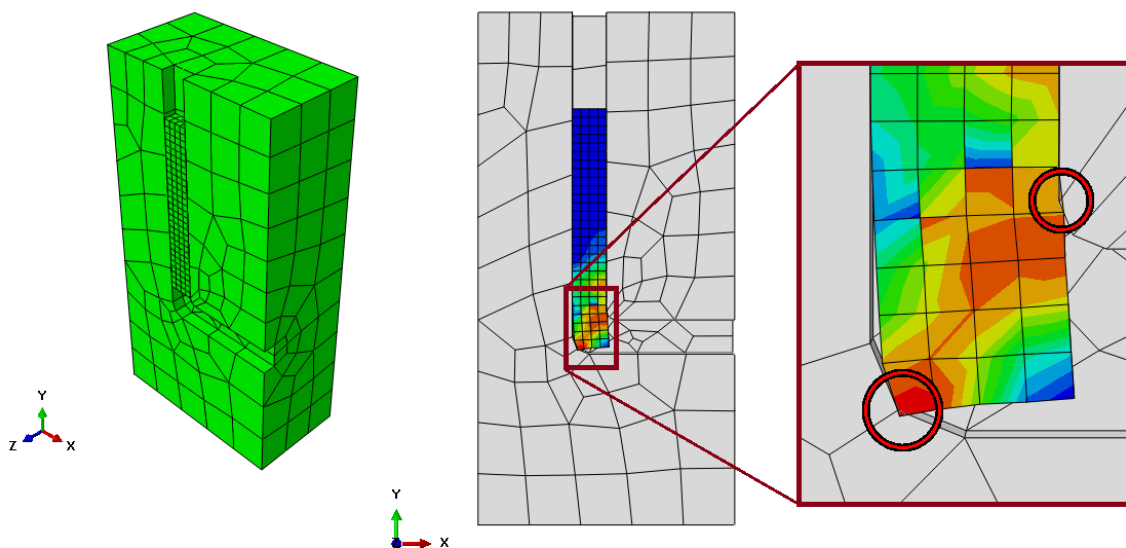
elemenata daje točniji i precizniji rezultat, no zbog ograničenja koje postavljaju karakteristike računala na kojem se simulacija obavlja, ne treba postavljati prevelik broj konačnih elemenata jer će to rezultirati dugotrajnim odvijanjem analize. Također, treba pripaziti da broj elemenata nije premalen jer je u tom slučaju vrlo vjerojatno rezultat daleko od željenog i točnog. Nakon nekoliko pokušaja provedbe analize s različitim brojem konačnih elemenata, odlučeno je da broj elemenata na uzorku iznosi 2880, a na matrici 13159. Slika 32 prikazuje uzorak i matricu s definiranim brojem konačnih elemenata.



Slika 32 – Definirani broj konačnih elemenata na matrici i uzorku

Na slici je vidljivo da se elementi na uzorku jednoliko raspoređeni po cijelom volumenu. Međutim, kod matrice to s namjerom nije slučaj. U postavkama mreže konačnih elemenata na matrici, podešeno je da je broj elemenata veći u dijelovima matrice koji čine ulazni i izlazni kanal, te posebno njihov spoj. Razlog tome je što u tim dijelovima postoji kontakt između matrice i uzorka te se konačni elementi na uzorku pomiču po kontaktnoj površini koju čine konačni elementi matrice. Kako je prijelaz iz ulaznog u izlazni kanal konstruiran s radijusima, jako je bitno da se ti radijusi pravilno definiraju točkama integracije, odnosno samim konačnim elementima. Slika 33 prikazuje primjer neželjenog rezultata simulacije gdje konačni elementi zbog reducirane integracije i manjeg broja

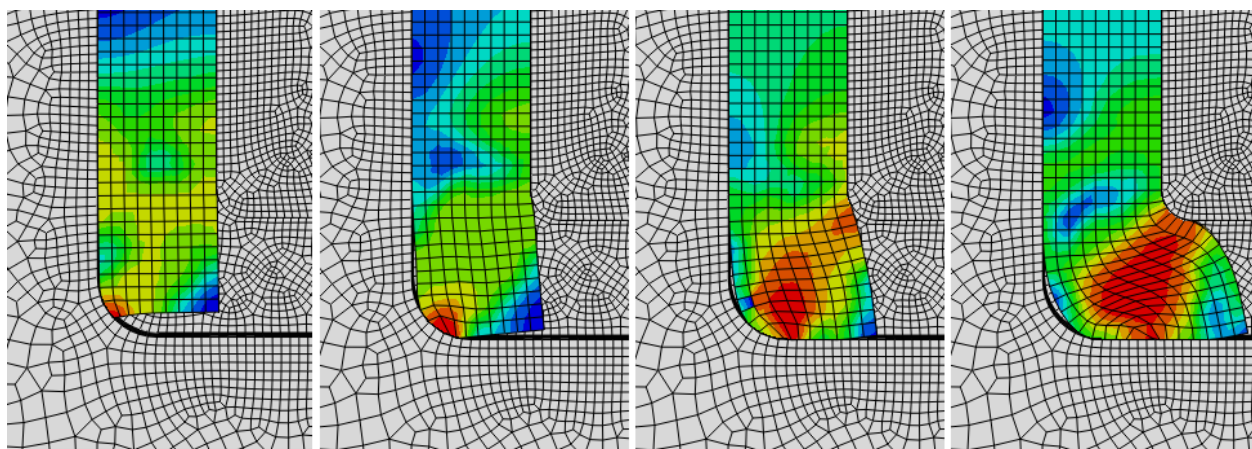
točaka integracije, prelaze jedan preko drugog i ne simuliraju realno deformiranje materijala. Kako ne bi došlo do takve, nedovoljno točne simulacije, na matrici je u spomenutim područjima povećana gustoća konačnih elemenata, točnije, povećan je broj točaka integracije i na taj način je osigurano pravilno kretanje konačnih elemenata uzorka tijekom deformiranja.



Broj konačnih elemenata:
Matrica = 267
Uzorak = 224

Nedovoljna točnost simulacije zbog
premale gustoće konačnih elemenata

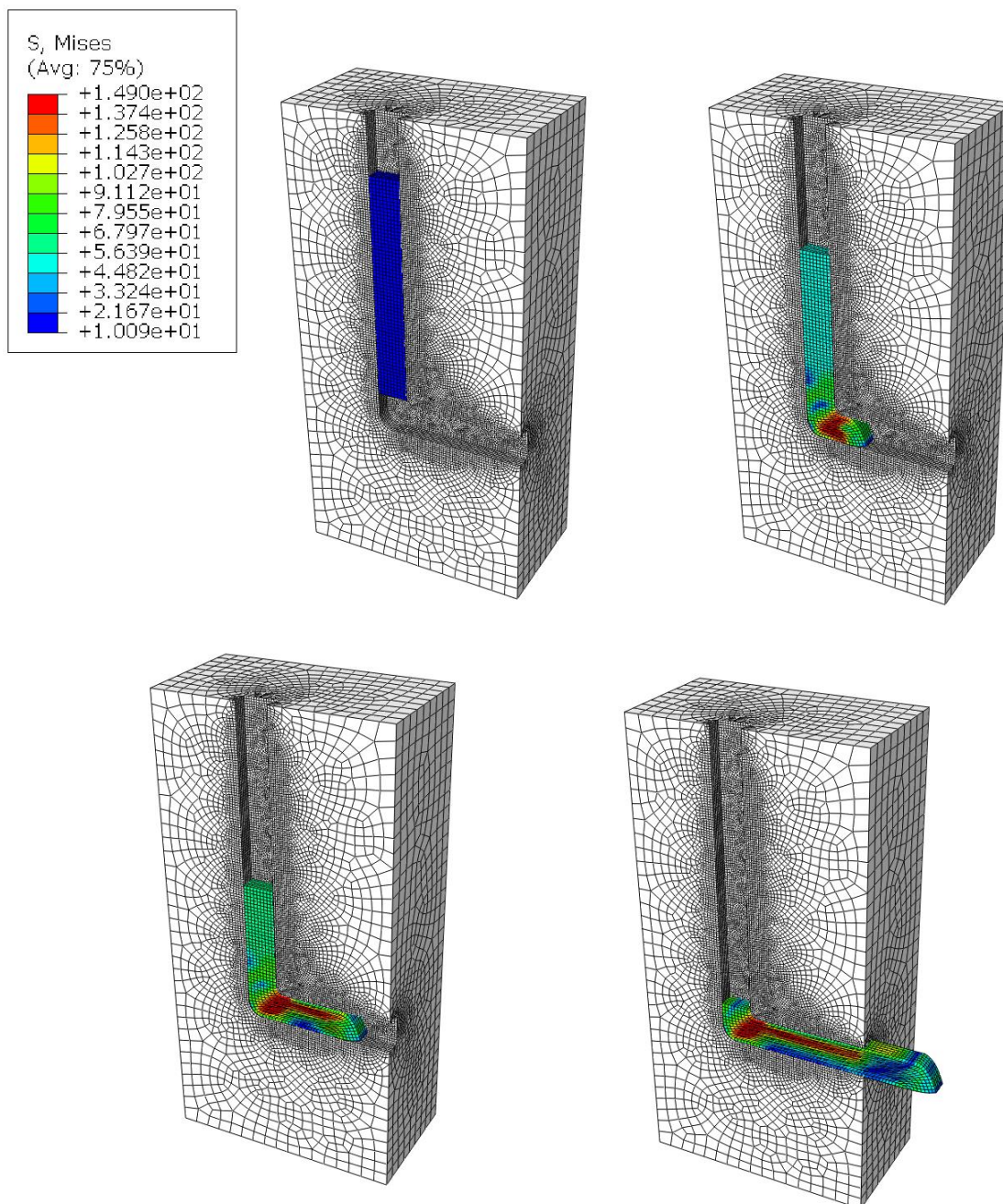
Slika 33 – Prikaz nepravilne simulacije kretanja materijala prilikom deformiranja



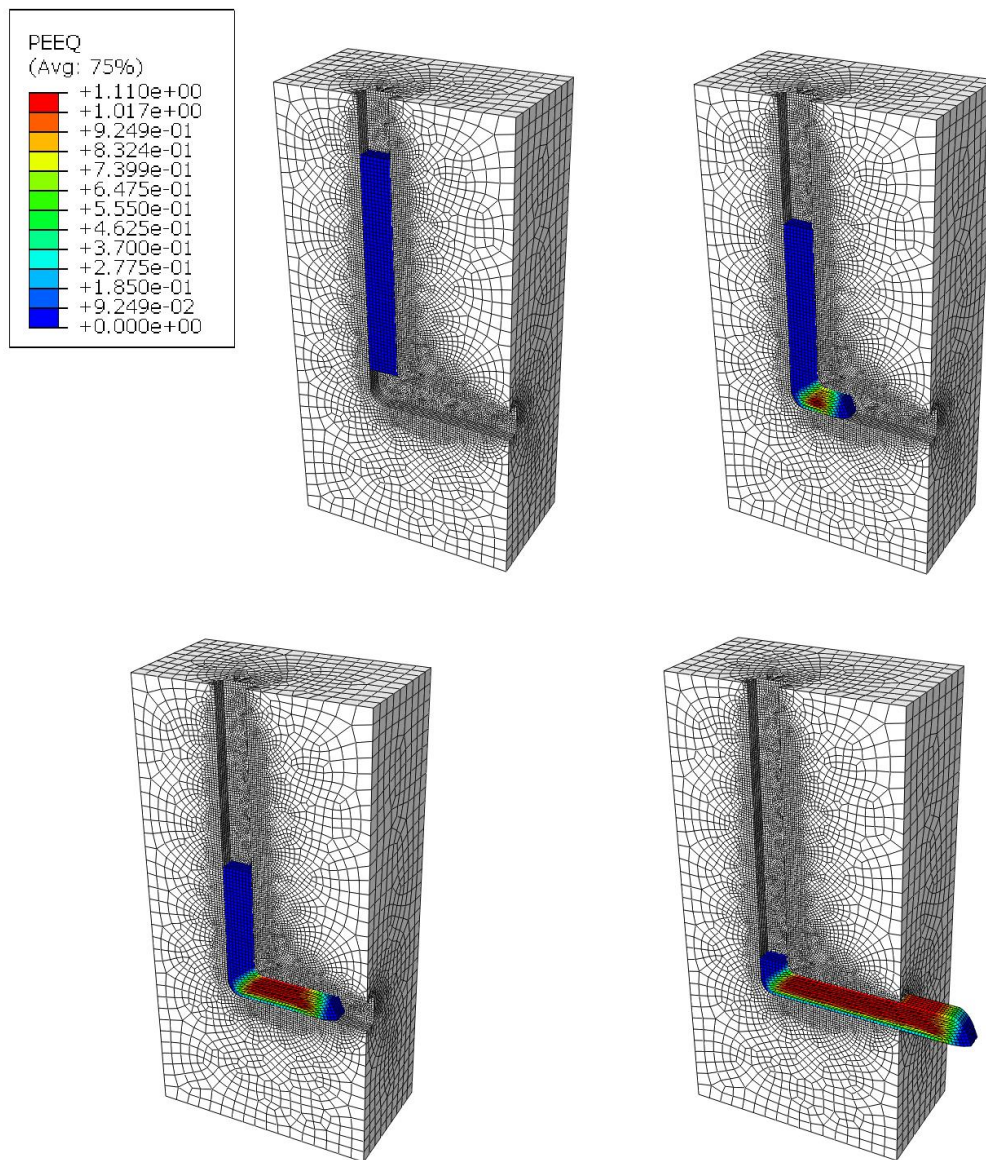
Slika 34 – Prikaz pravilne simulacije kretanja materijala prilikom deformiranja

5. slučaj – rezultati

Nakon provedene analize za slučaj kuta između ulaznog i izlaznog kanala matrice u iznosu od 90° , dobiveni su slijedeći rezultati – Slika 35 prikazuje intenzitet i raspodjelu naprezanja po von Misesu dok su na Slici 36 prikazani intenzitet i raspodjela ekvivalentnih plastičnih deformacija.



Slika 35 – Naprezanja po von Misesu – 5. slučaj

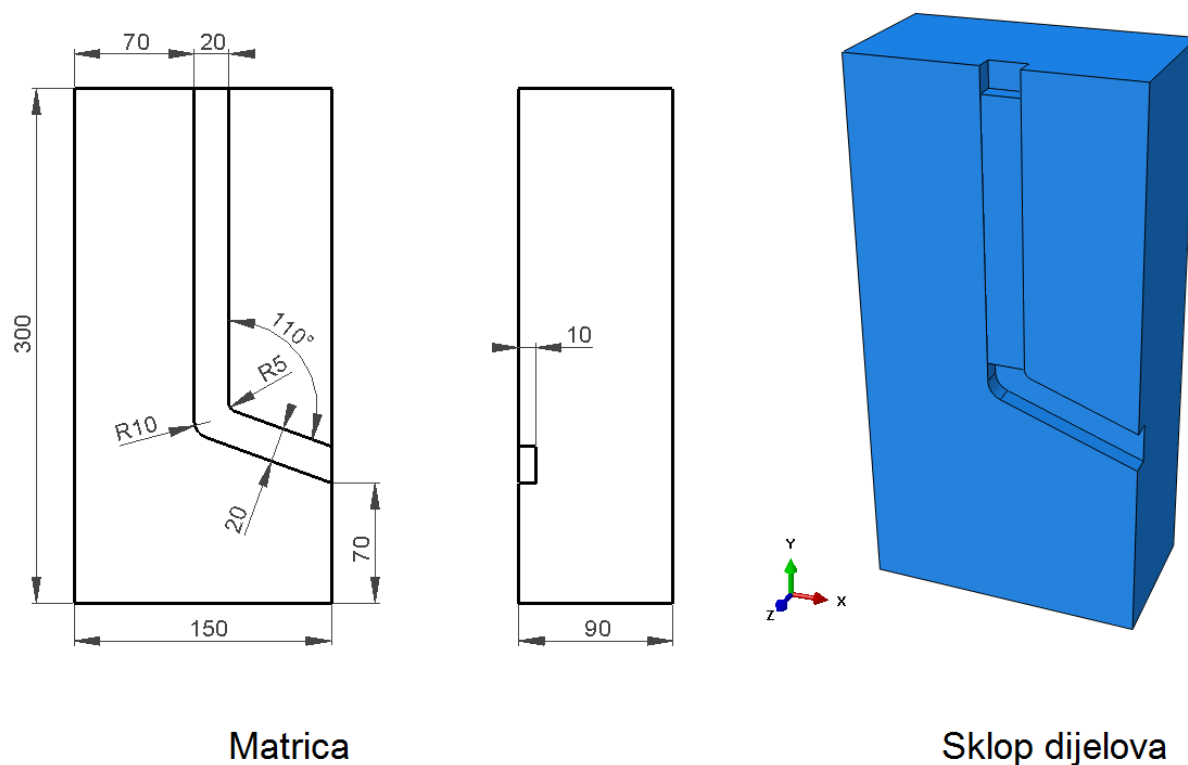


Slika 36 – Ekvivalentna plastična deformacija – 5. slučaj

Usporedbom ovih rezultata s onima dobivenim dvodimenzionalnom analizom (1. slučaj), ne primjećuje se nikakva značajnija razlika u iznosima naprezanja i deformacija. Međutim, razmatrajući distribuciju deformacija može se primijetiti značajna razlika. Usporedbom Slike 15 i Slike 36, vidljivo je da se u slučaju trodimenzionalne analize maksimalna plastična deformacija postigla po puno većem volumenu uzorka (~80%) dok je u slučaju dvodimenzionalne analize tek oko 30% uzorka pretrpjelo maksimalnu deformaciju u iznosu od 1,11.

6. slučaj $\Phi = 110^\circ$

Iduća simulacija provedena je s alatom konstruiranim na način da je kut između ulaznog i izlaznog kanala povećan na 110° . Slika 36 prikazuje dimenzije matrice i sklop matrice i uzorka. Dimenzije uzorka ostale su iste, kao što je i broj konačnih elemenata. Postavljeni su identični rubni uvjeti kao u i prethodnom slučaju, jednako kao i svojstva materijala.



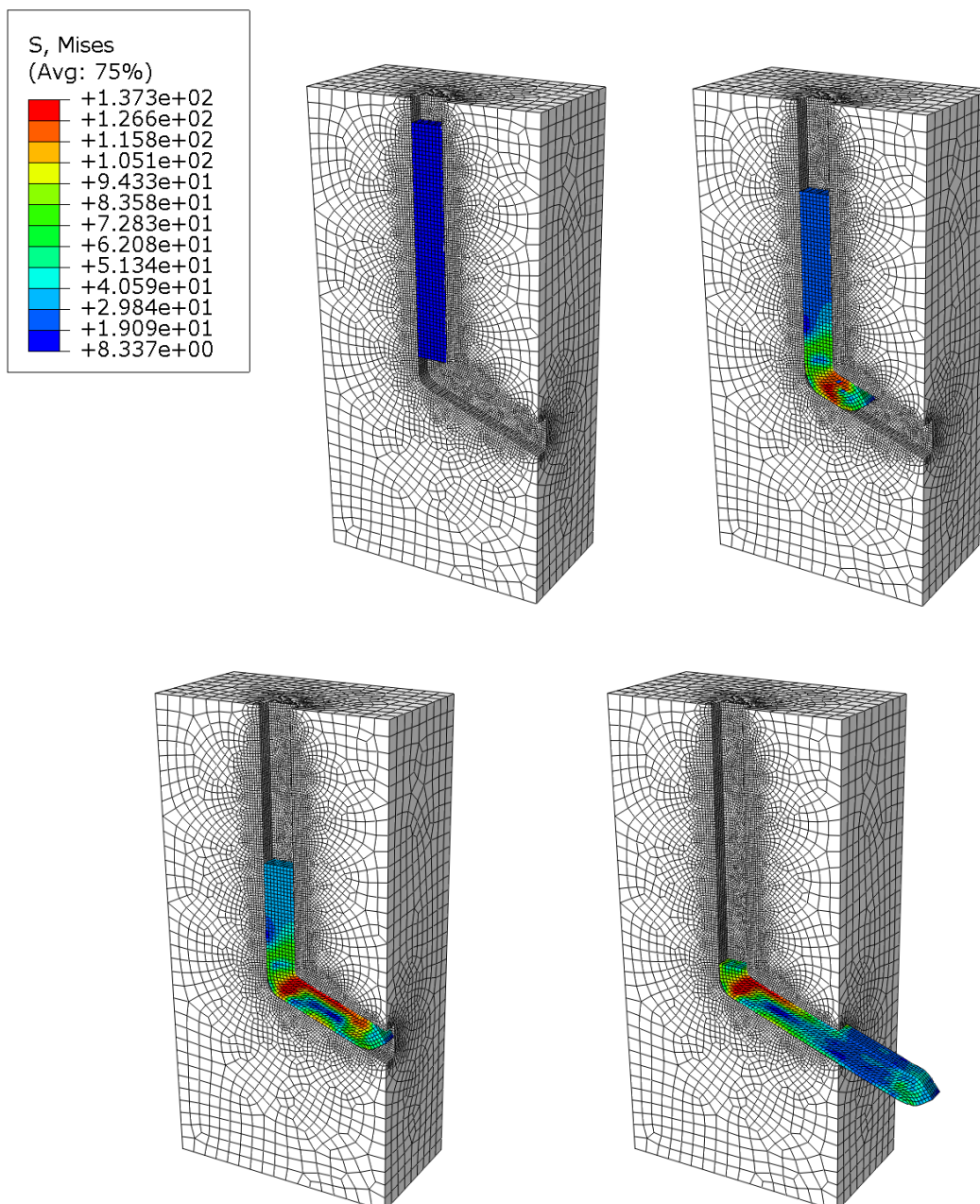
Matrica

Sklop dijelova

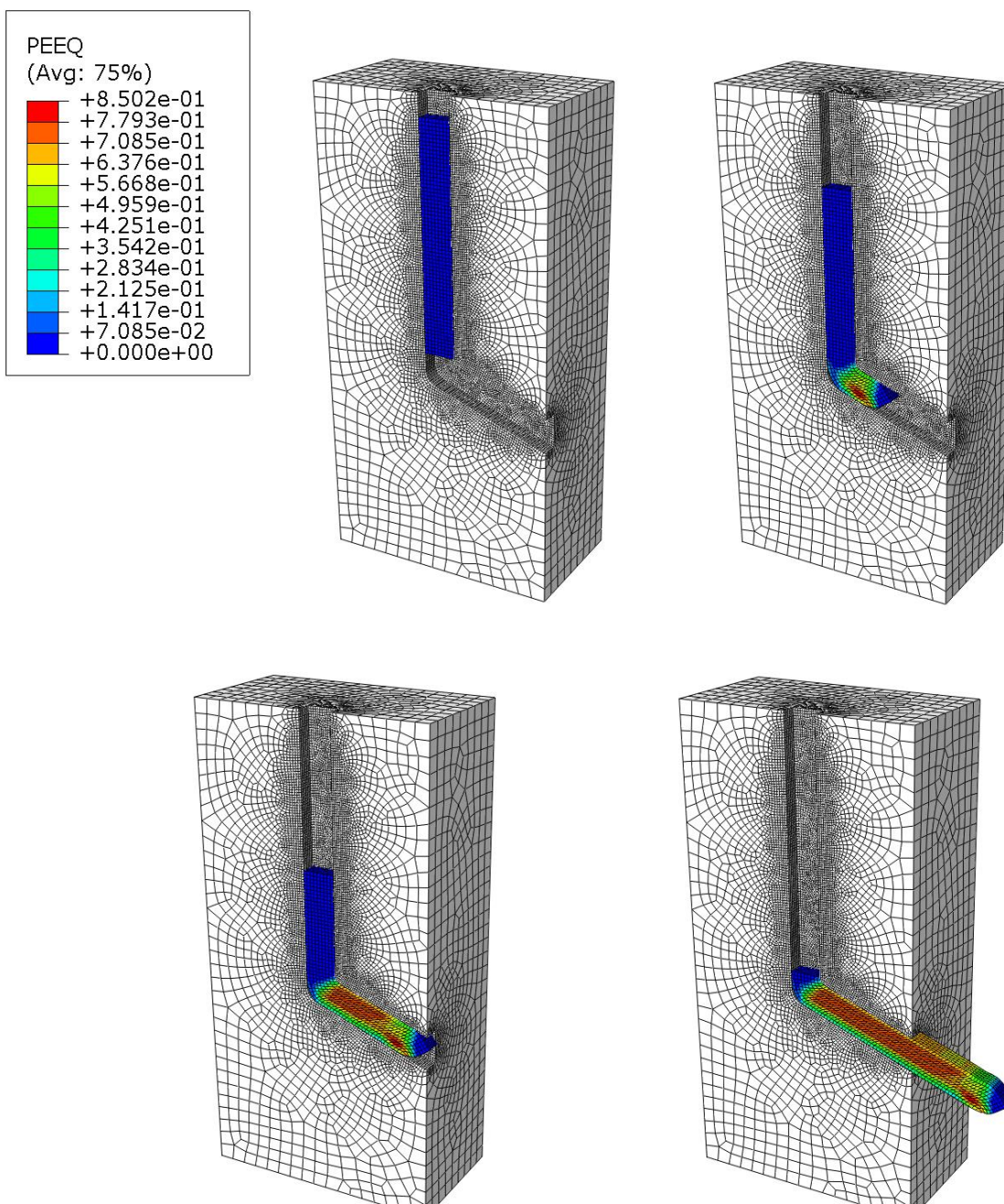
Slika 37 – Dimenzije matrice i sklop dijelova – 6. slučaj

6. slučaj – rezultati

Iz izraza (1) lako se dokazuje da s porastom kuta Φ , materijal koji se obrađuje doživljava manju deformaciju. Stoga se u ovom slučaju očekuje manji iznos deformacije nego u prethodnom, što je i vidljivo na Slikama 38 i 39, koje prikazuju rezultate simulacije kutne ekstruzije s matricom čiji je kut između kanala 110° .



Slika 38 – Naprezanja po von Misesu – 6. slučaj

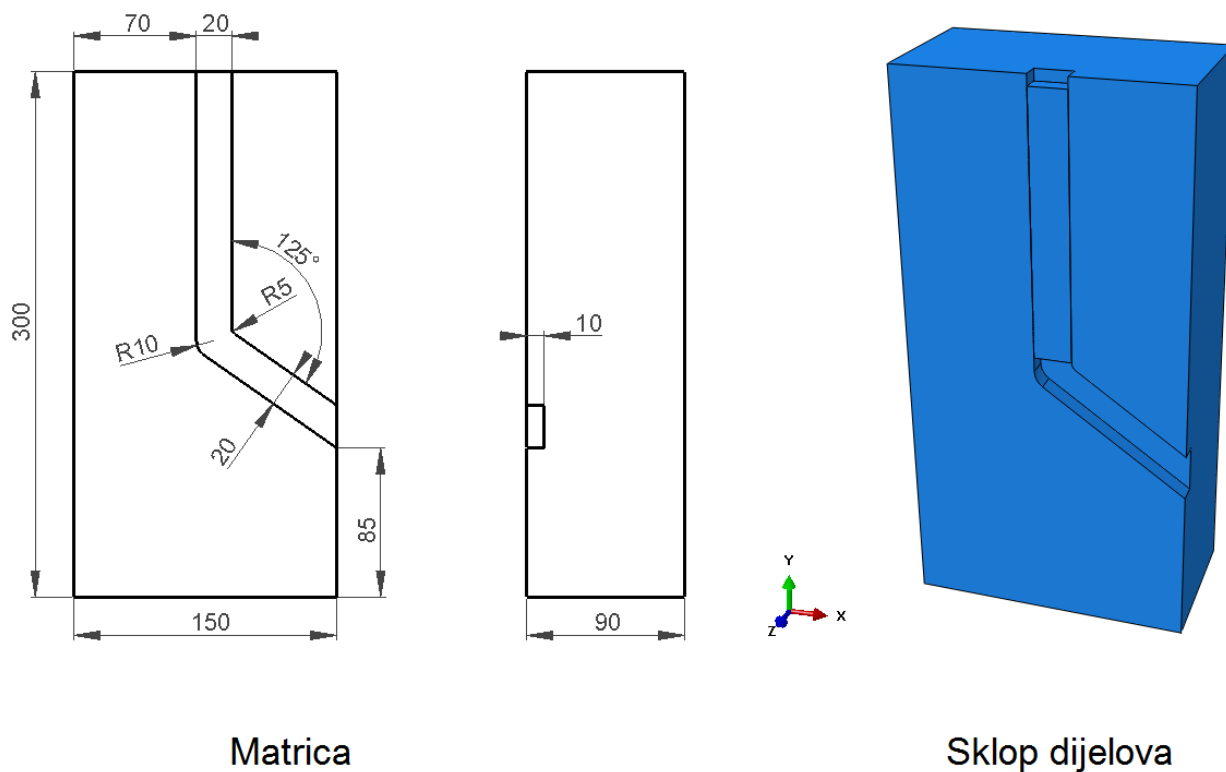


Slika 39 – Ekvivalentna plastična deformacija – 6. slučaj

Usporedbom rezultata dvodimenzionalne i trodimenzionalne analize u slučaju kuta od 110° ne primjećuju se znatnije razlike u distribuciji deformacija. S druge strane, vidljive su male razlike u iznosima maksimalne deformacije (5% veća u trodimenzionalnoj simulaciji) te naprezanja (1% veće u dvodimenzionalnoj simulaciji).

7. slučaj $\Phi = 125^\circ$

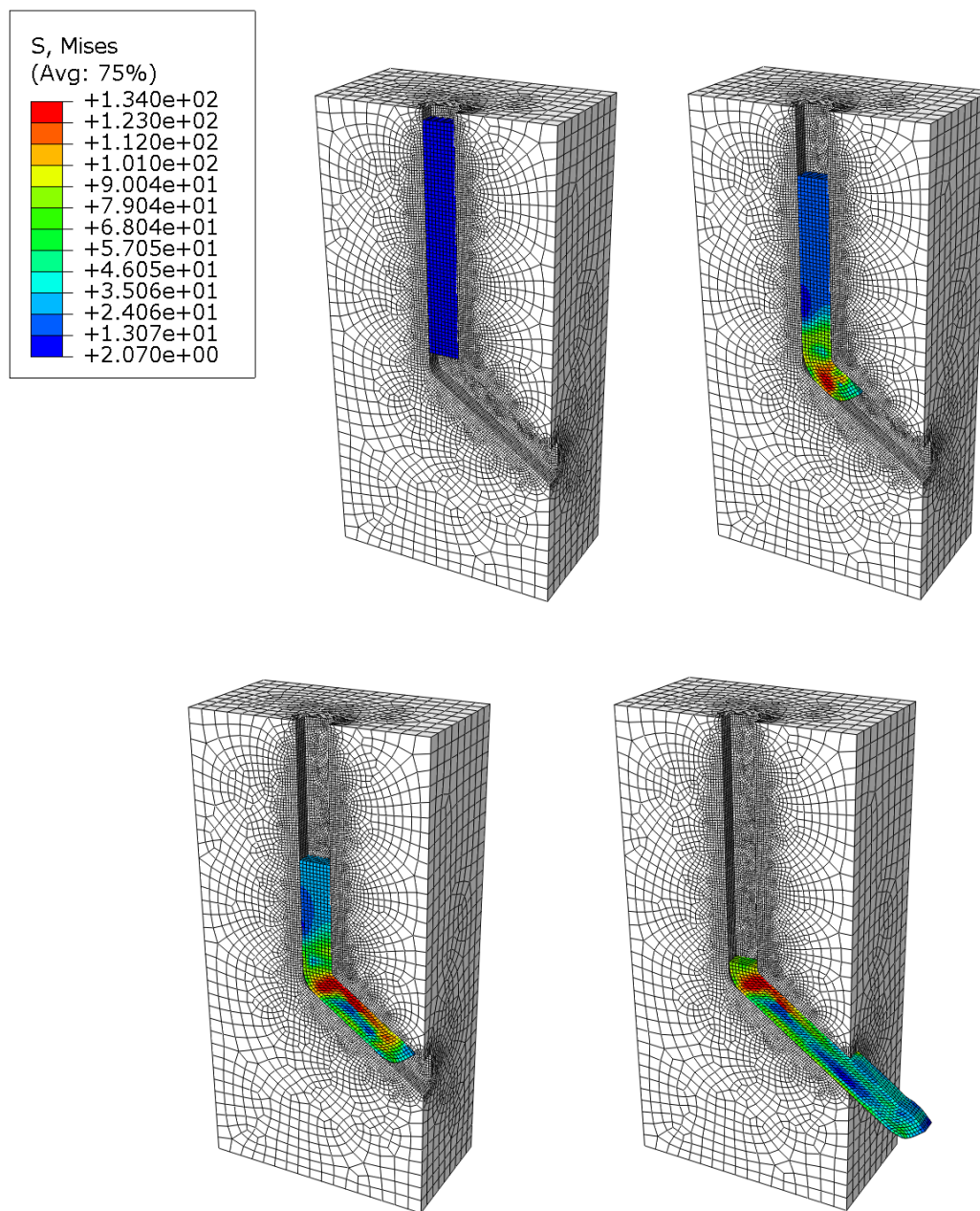
Na Slici 40 prikazane su dimenzije matrice te sklop dijelova za slučaj s kutom između kanala u iznosu od 125° .



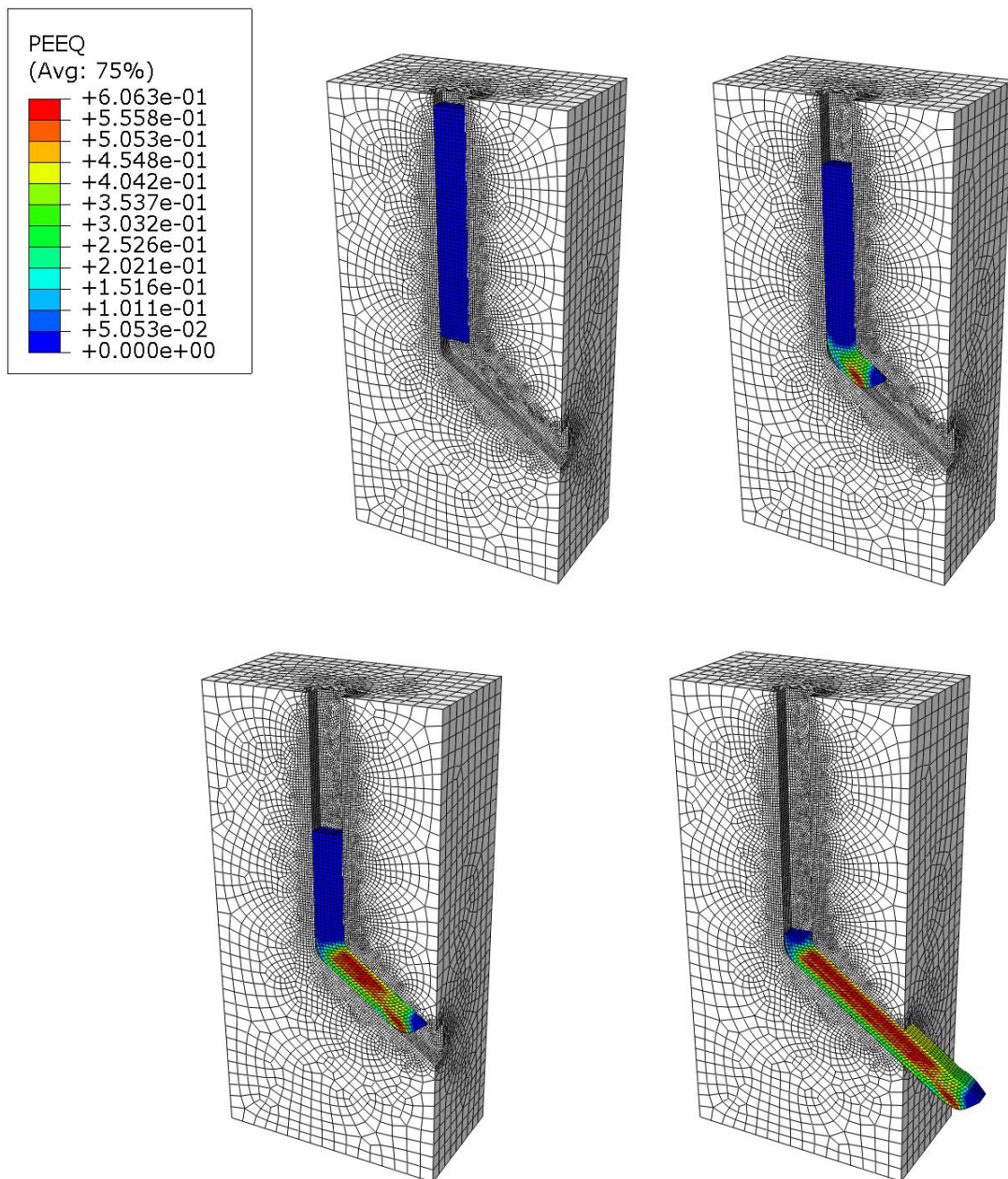
Slika 40 – Dimenzije matrice i sklop dijelova – 7. slučaj

7. slučaj – rezultati

Prema očekivanjima, rezultati simulacije procesa kutne ekstruzije s kutom između kanala matrice u iznosu od 125° potvrđuju smanjenje nametnute deformacije i naprezanja na uzorku od čistog aluminija. Postignuta naprezanja i deformacije prikazana su na Slikama 41 i 42.



Slika 41 – Naprezanja po von Misesu – 7. slučaj

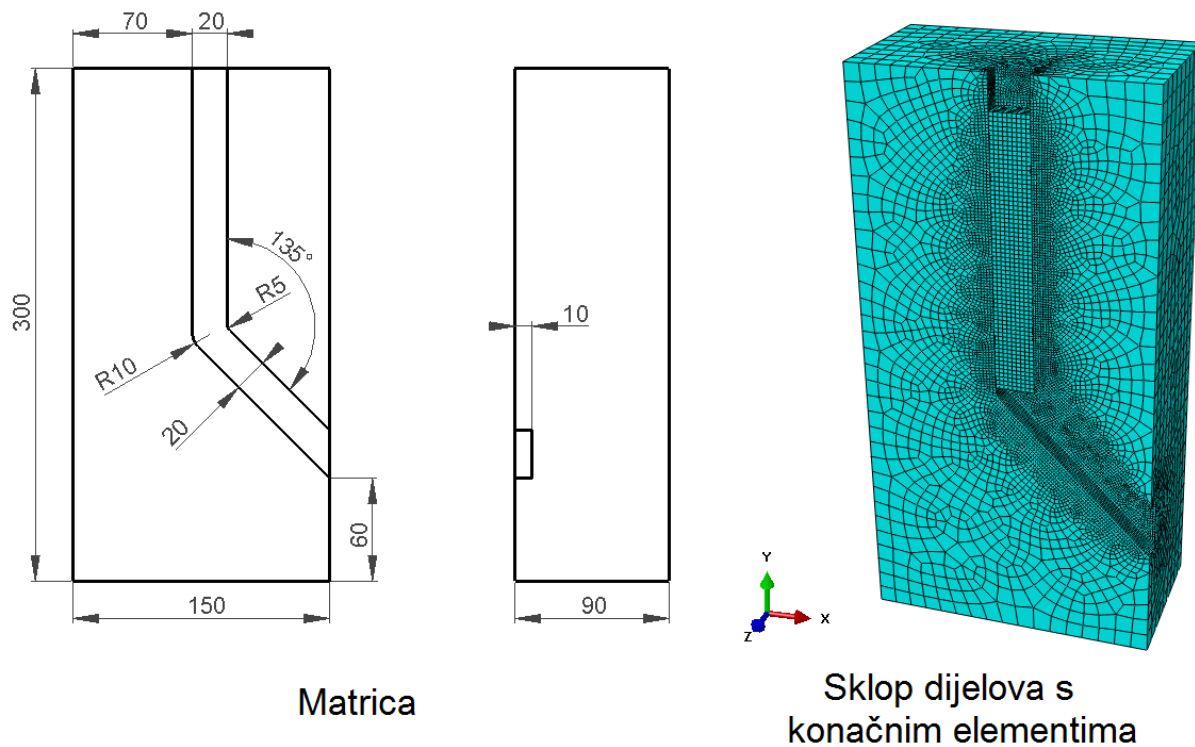


Slika 42 – Ekvivalentna plastična deformacija – 7. slučaj

U ovom slučaju vidljiva je nešto veća razlika dobivenih rezultata u odnosu na one iz 3. slučaja. Iznosi naprezanja približno su jednaki, no maksimalna deformacija nametnuta uzorku u trodimenzionalnoj analizi manja je za 23% od one iz dvodimenzionalne analize, odnosno 3. slučaja.

8. slučaj $\Phi = 135^\circ$

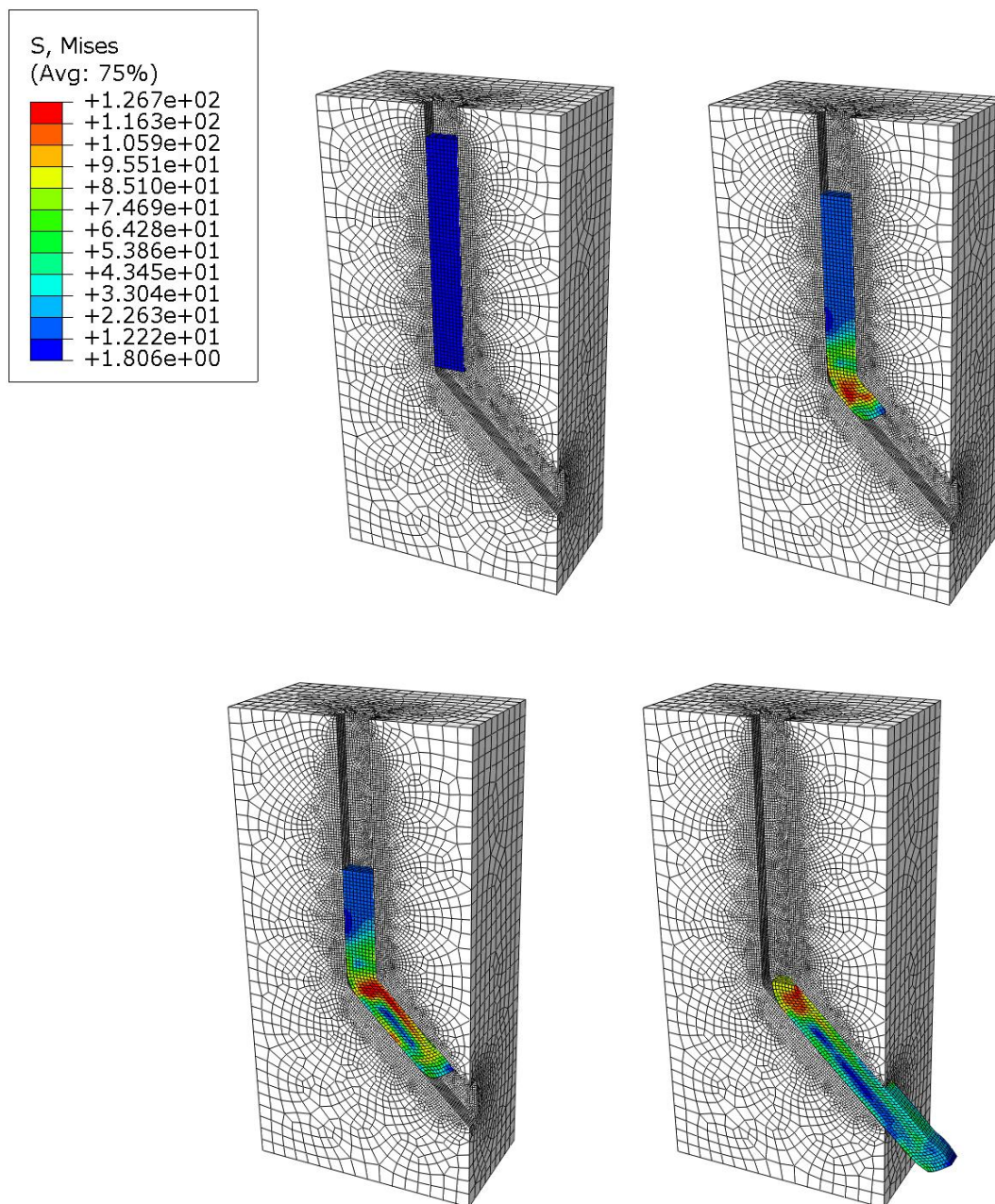
Na posljepku je provedena numerička analiza kutne ekstruzije s kutom Φ u iznosu od 135° . Slika 43 prikazuje dimenzije matrice i konačne elemente definirane na matrici i uzorku.



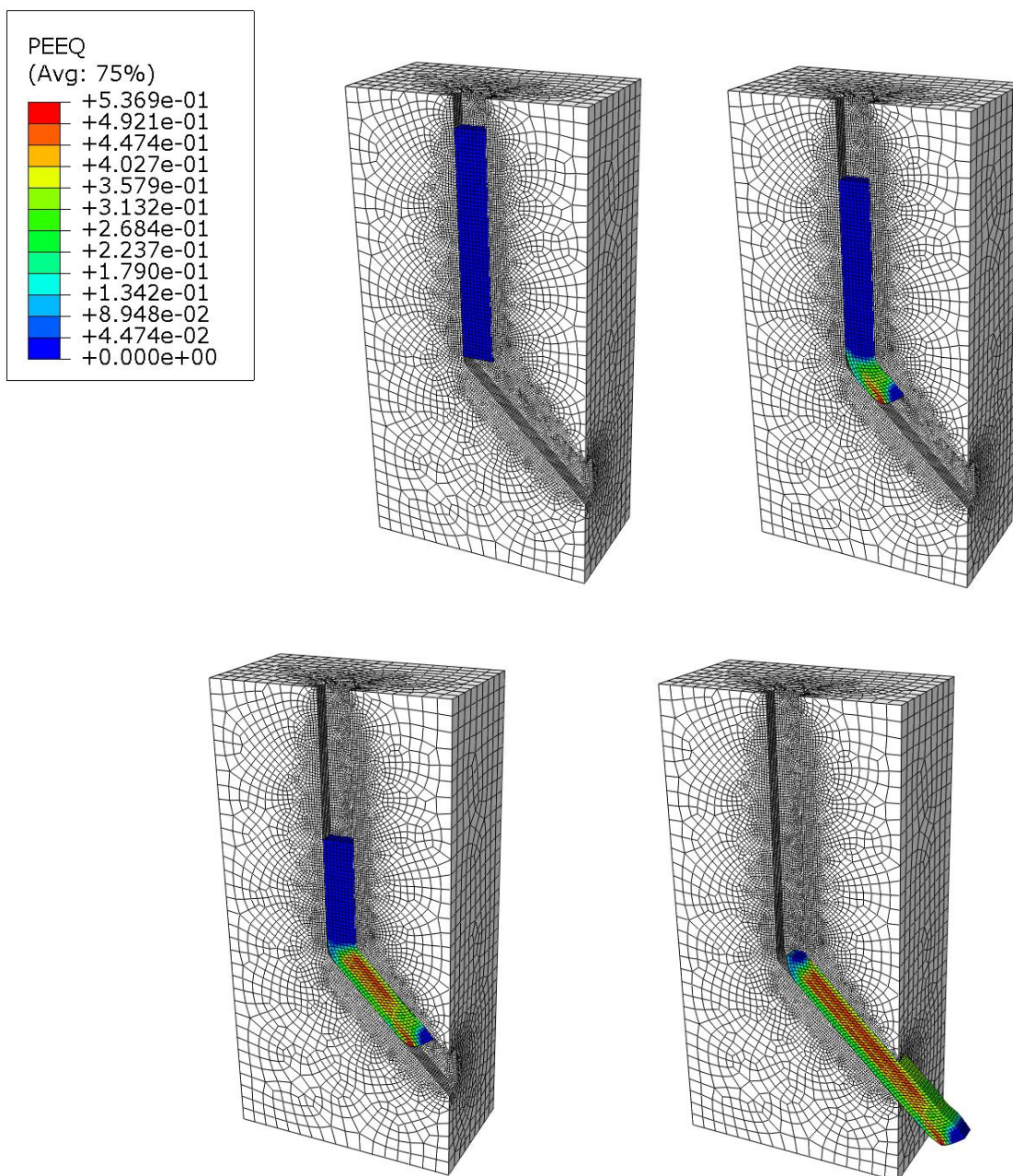
Slika 43 – Dimenzije matrice i sklop dijelova s konačnim elementima – 8. slučaj

8. slučaj – rezultati

Iz Slika 44 i 45 jasno je vidljivo da je u slučaju s kutom između kanala matrice od 135° uzorku nametnuta najmanja deformacija i najmanje naprezanje u usporedbi sa ostalim slučajevima trodimenzionalne analize.



Slika 44 – Naprezanja po von Misesu – 8. slučaj

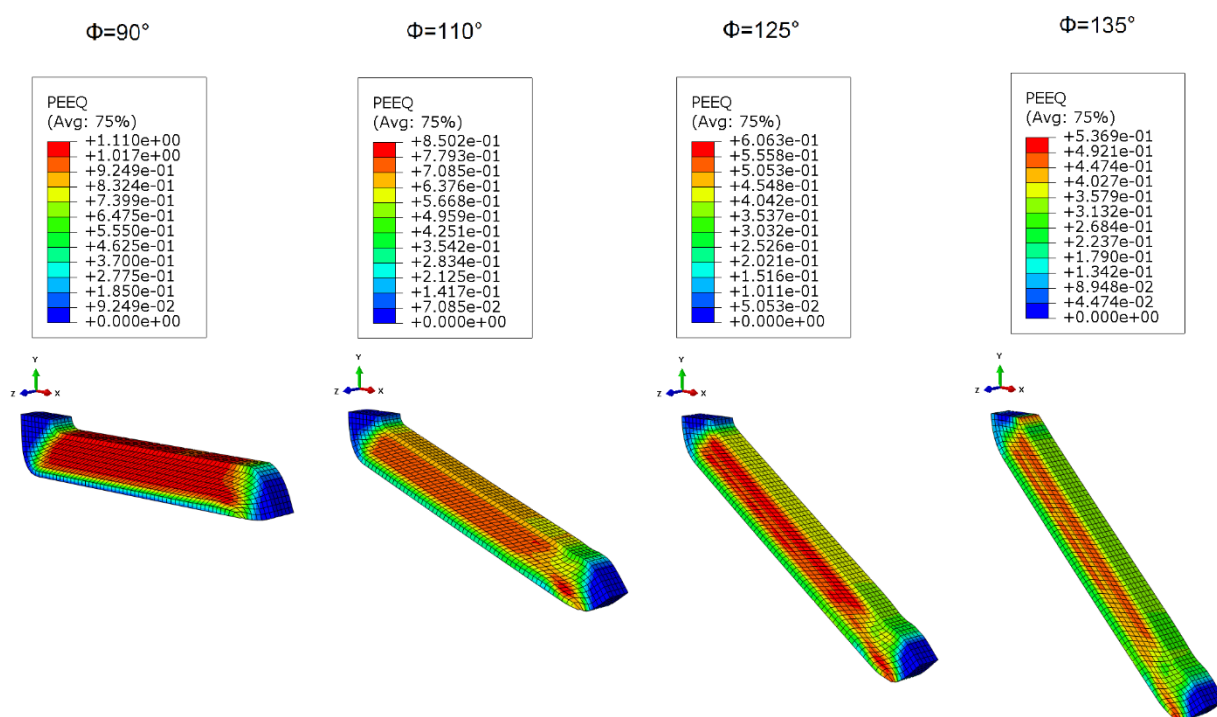


Slika 45 – Ekvivalentna plastična deformacija – 8. slučaj

I u posljednjem slučaju trodimenzionalne simulacije kutne ekstruzije vidljive su neke razlike u odnosu na dvodimenzionalnu simulaciju. Iznosi naprezanja ponovno su približno jednaki. Međutim, maksimalna deformacija nametnuta uzorku u trodimenzionalnoj analizi manja je za 29% od one iz 4. slučaja.

3.5. Zaključak trodimenzionalne numeričke analize

U drugom dijelu rada, metodom konačnih elemenata ponovno su analizirana četiri različita slučaja kutne ekstruzije uzorka od čistog aluminija u ovisnosti o kutu Φ (90° , 110° , 125° i 135°). Međutim, u ovome dijelu sve su simulacije provedene u trodimenzionalnom sustavu. Ponovno je dokazan značajan utjecaj kuta matrice na deformacije kojima je podvrgnut materijal koji se obrađuje postupkom kutne ekstruzije. Na Slici 46 prikazana je usporedba konačnih oblika aluminijskih uzoraka te nastalih deformacija u njima nakon trodimenzionalne simulacije obrade u svakom od četiriju različitih konstrukcija alata.

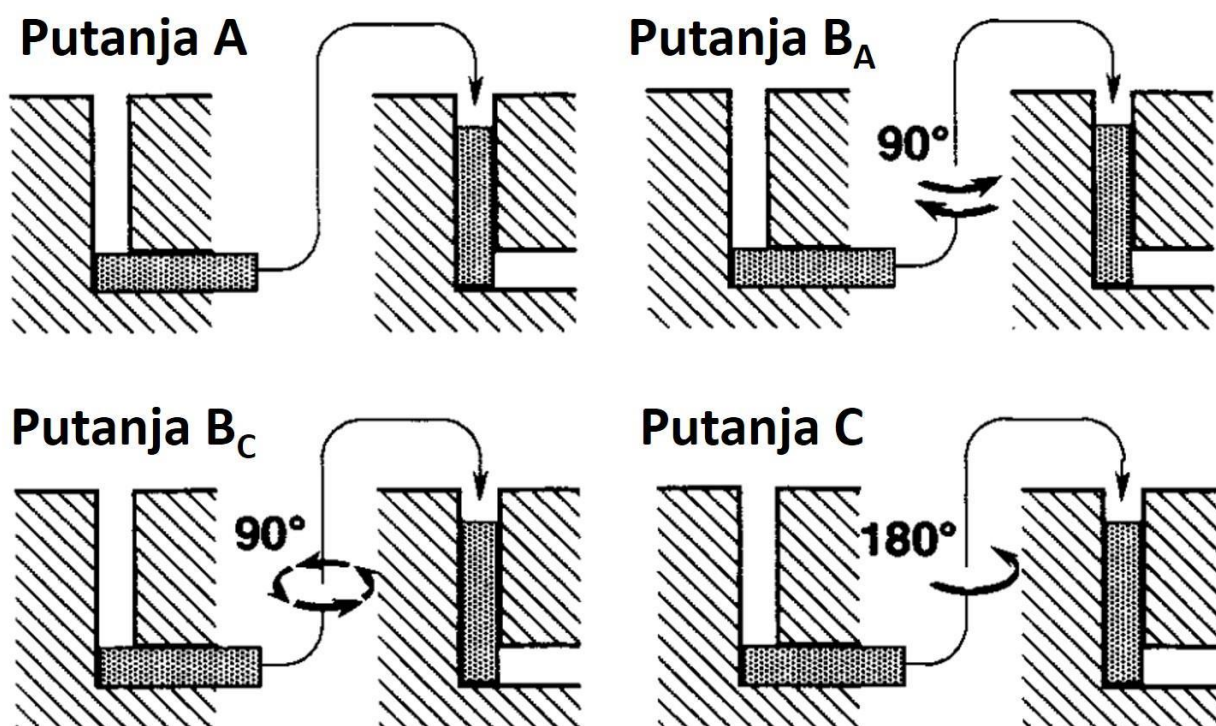


Slika 46 – Usporedba konačnih stanja uzoraka nakon trodimenzionalnih simulacija

Kao što je bio slučaj u dvodimenzionalnoj analizi, i ovdje se može primijetiti nejednolika distribucija deformacija koje je pretrpio uzorak. Samim time i svojstva materijala su različita po cijelom volumenu uzorka. Jedan od nedostataka procesa kutne ekstruzije predstavlja činjenica da zbog prirode provođenja ovog postupka, početak i kraj svakog uzorka koji se deformira, ostaje nedeformiran ili jako slabo deformiran. Iz tog razloga se radi nepovoljnih mehaničkih svojstava u tim dijelovima, moraju ukloniti početni i krajnji dio

obratka. U nekim slučajevima to može značiti uklanjanje i do 60% ukupnog volumena obrađivanog materijala.

Kako bi se postigla što povoljnija distribucija deformacije po volumenu uzorka, kutna ekstruzije se provodi u više faza. Nakon prvog prolaska, poprečni presjek uzorka nije se promijenio te je moguće ga opet postaviti na početak ulaznog kanala matrice i ponoviti proces. Iz Slike 46 vidljivo je da su deformacije nametnute uzorku veće u gornjem dijelu cijelog uzorka. Ukoliko bi se uzorak na isti način (u istom početnom položaju) ponovno išao obraditi, gornji dio uzorka opet bi bio podvrgnut većim deformacijama nego donji. Istraživanjima [1] je ustanovljeno da se bolji rezultati mogu postići uz promjenu položaja, odnosno rotaciju samog uzorka oko uzdužne osi, između svake faze procesa. Postoje



Slika 47 – Prikaz načina izvođenja kutne ekstruzije – putanje: A, B_A, B_C i C [1]

razni načini rotacije uzorka između faza, no slijedeći su pokazali najbolji učinak: putanja A, putanja B_A, putanja B_C i putanja C; prikazane na slici 47.

Kod putanje A uzorak se ne rotira između faza procesa kutne ekstruzije. U radu je numeričkim analizama simulirana samo jedna faza procesa i vidljiva distribucija

deformacija ponovila bi se u idućim fazama, ukoliko se uzorak ne bi rotirao nakon svake. Naravno, dodatnim fazama povećavala bi se ukupna deformacija nametnuta uzorku.

Putanja B_A podrazumijeva rotiranje uzorka nakon svake faze za 90° naizmjeničnim smjerom. Kod putanje B_C uzorka se rotira u istom smjeru nakon svake faze za 90° , dok se kod putanje C uzorak rotira za 180° nakon svake faze. Usporedbom unutarnjih modela smične deformacije pojedinog načina rotacije uzorka i analiziranjem snimaka mikrostrukture pomoću elektronskog mikroskopa [1] dokazano je da se najbolji rezultati postižu provođenjem kutne ekstruzije u više faza s rotacijom za 90° (u istom smjeru) nakon svake faze, odnosno putanjom B_C .

Provedba numeričke simulacije na računalu zahtijeva određeno vrijeme. Za početak, dio vremena potreban je za modeliranje cijelog promatranog sustava, odnosno: definiranje geometrije i svojstava materijala svih dijelova prisutnih u analizi, postavljanje rubnih uvjeta i definiranje mreže konačnih elemenata. Nakon toga, procesor ima sve potrebne podatke kako bi riješio problem matematičkog modeliranja, za što mu je potrebno određeno vrijeme. Više je faktora koji utječu na brzinu kojom će računalo doći do rješenja.

Prvi faktor predstavlja mreža konačnih elemenata kojom se diskretizira promatrani model. Što je mreža gušća, odnosno broj konačnih elemenata veći, simulacija će biti točnija, ali će računanje trajati duže.

Drugo, kompleksnost promatranog problema dakako utječe na vrijeme potrebno za njegovo rješavanje. Vrijeme potrebno za numeričku analizu nekog modela s puno dijelova, kompleksnije geometrije i velikog broja rubnih uvjeta, zasigurno će zahtijevati puno vremena za rješavanje. Sama kutna ekstruzija podrazumijeva istovremenu veliku smičnu deformaciju i troosno naprezanje uzorka te stoga zahtjeva više vremena za računanje, od na primjer analize savijanja jedne grede. Trodimenzionalna analiza kutne ekstruzije provedena je za četiri različita slučaja, u Tablici 5 prikazana je usporedba vremena potrebnih za računanje rješenja svakog od njih. Vidljivo je kako je u slučaju trodimenzionalne analize i kuta između kanala matrice od 90° , samim time i najvećih deformacija, bilo potrebno najviše vremena za računanje.

Treći i najutjecajniji faktor su karakteristike računala na kojem se simulacija obavlja. Jasno je da u današnje vrijeme, kada tehnologija grabi velike korake u napretku, postoje računala koja bi jako kompleksne probleme mehanike deformabilnih tijela, numeričkim analizama riješile u svega par sekundi. Međutim, pitanje je isplativosti takvih računala ukoliko bi se ona koristila samo za provođenje numeričkih analiza. Stoga je potrebno pronaći neki optimum prilikom odabira komponenti koje čine računalo i definiraju njegovu „snagu“. Numerička simulacija opterećuje većinu komponenta računala, no najbitnije su glavni procesor i radna memorija. U radu je svaka analiza provedena na istom računalu čije su najbitnije karakteristike slijedeće:

- procesor s četiri jezgre i brzinom od 2.0 GHz,
- 4GB radne memorije.

Tablica 5 – Usporedba vremena potrebnog za rješavanje numeričkih analiza

	Kut ϕ [°]	Vrijeme potrebno za računanje numeričkog rješenja t_{num} [h]
2D ANALIZA	90	1,2
	110	0,9
	125	0,6
	135	0,5
3D ANALIZA	90	6,3
	110	6
	125	4,4
	135	4

3.6. Usporedba 2D i 3D numeričkih analiza

U Tablici 6 prikazane su vrijednosti deformacija izračunatih ($\epsilon_{ekv,rač}$) pomoću izraza (1) te maksimalne deformacije dobivene numeričkim analizama ($\epsilon_{ekv,num}$). Iznosi kuta između kanal matrice su oni analizirani kroz ukupno osam slučajeva, po četiri u dvodimenzionalnoj i trodimenzionalnoj analizi. Kut Ψ (kut na vanjskom dijelu spoja kanala matrice) izračunat je na temelju geometrija matrica prikazanih u analizi svakog od slučaja.

Tablica 6 – Usporedba rezultata analize s izračunatim vrijednostima deformacije

Kut Φ [°]	Kut Ψ [°]	Izračunata deformacija $\epsilon_{ekv, rač}$	Deformacija dobivena numeričkom analizom $\epsilon_{ekv, num}$	
90	36,9	0,99	1,12	2D ANALIZA
110	31,4	0,74	0,81	
125	25,8	0,57	0,79	
135	21,6	0,46	0,76	
90	36,9	0,99	1,11	3D ANALIZA
110	31,4	0,74	0,85	
125	25,8	0,57	0,61	
135	21,6	0,46	0,54	

Usporede li se međusobno maksimalne deformacije dobivene dvodimenzionalnom i trodimenzionalnom analizom za slučaj s kutom Φ u iznosu od 90°, jasno je vidljivo da ne postoji skoro nikakva razlika. Međutim, usporedbom s izračunatom deformacijom, simulacijama je dobivena deformacija veća za otprilike 12%, što također ne predstavlja značajnu razliku. Mogući razlog takve razlike u deformacijama jest radijus postavljen (radi pojednostavljenja provođenja numeričkih analiza) na unutarnji dio spoja ulaznog i izlaznog kanala.

U slučaju kuta između kanala matrice od 110°, u 2D analizi dobivena je deformacija veća od izračunate za 9% dok je u slučaju 3D analize dobivena deformacija veća za skoro 15%.

Nadalje, u slučaju kuta u iznosu od 125° dolazi do veće razlike između 2D i 3D analize. Rezultat dobiven 2D analizom, od izračunatog je veći za 39% dok je puno točniji rezultat dobiven trodimenzionalnom analizom i veći je od izračunatog za 7%.

U posljednjem slučaju s kutom od 135° , usporedbom maksimalne deformacije postignute u materijalu tijekom dvodimenzionalne analize s izračunatom vrijednošću, primjećuje se razlika od čak 65%. Dok je 3D analizom postignuta deformacija veća od izračunate za tolerantnih 17%.

Usporedbom ovih rezultata potvrđen je značaj provođenja numeričke analize u trodimenzionalnom sustavu jer su postignute deformacije znatno točnije od onih dobivenih u dvodimenzionalnim analizama.

4. EKSPERIMENTALNA ANALIZA KUTNE EKSTRUZIJE

Na posljertku rada provedena je eksperimentalna analiza procesa kutne ekstruzije. Alat postavljen na hidrauličku prešu izrađen je od alatnog čelika i kut između kanala matrice, Φ iznosio je 90° . Materijal uzorka je čisti aluminij, a dimenzije poprečnog presjeka su 14 mm x 14 mm. Za podmazivanje je korišteno mazivo koje podnosi vrlo visoke pritiske, a sastoji se od smjese grafita i molibden disulfida. Svi dijelovi i oprema prikazani su na Slici 48. Mazivo je prije obrade nanoseno u sam ulazni kanal matrice te na žig koji će pritiskati uzorak. Na taj način znatno je smanjen koeficijent trenja između matrice i uzorka te matrice i žiga.



Slika 48 – Prikaz opreme i dijelova korištenih u eksperimentalnoj analizi

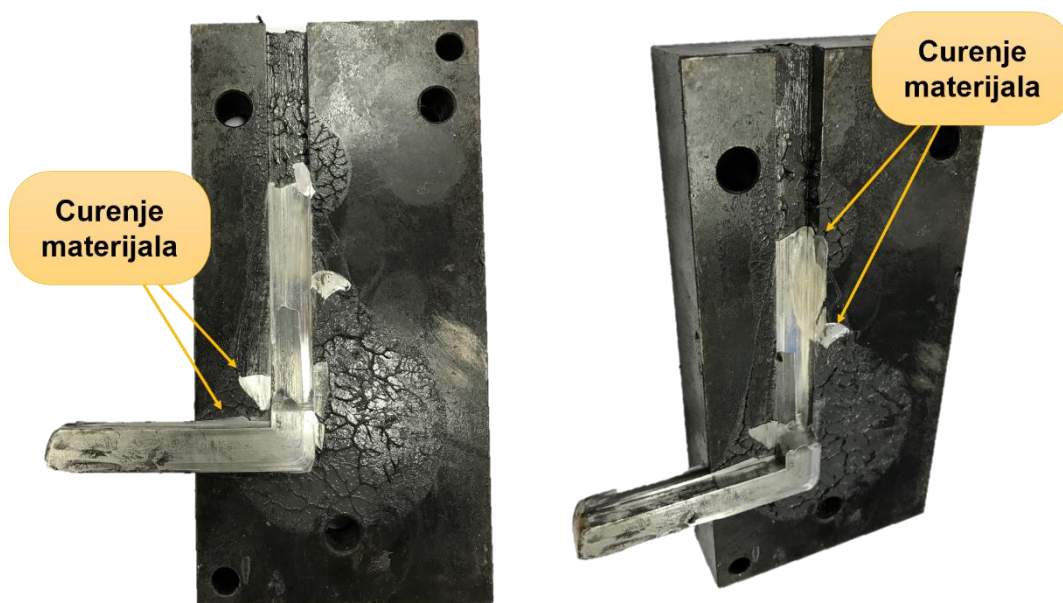
Dvije su svrhe ovog ispitivanja, prva je usporedba sile oblikovanja dobivena eksperimentom s onom dobivenom u numeričkoj analizi, a druga je usporedba tvrdoće materijala prije i poslije provedenog deformiranja u alatu za kutnu ekstruziju.

4.1. Usporedba sila oblikovanja

Pet uzoraka od čistog aluminija kutno su ekstrudirana kako bi se zadovoljio statistički minimum i mogla odrediti srednja vrijednost maksimalne sile oblikovanja koja će se usporediti s onom dobivenom u numeričkoj simulaciji (dodatno provedenoj na uzorku dimenzija poprečnog presjeka 14mm x 14 mm). U eksperimentu se, kao i u simulaciji, promatra samo prva faza, odnosno prvi prolazak uzorka kroz alat.

Na Slici 49 prikazan je obrađeni prvi uzorak u jednoj polovici matrice. Jasno je vidljiva nepoželjna pojava curenja materijala uzorka u zračnosti između dviju polovica matrice. Dva su moguća razloga takvog ponašanja materijala:

- 1) dimenzije poprečnog presjeka žiga manje su od dimenzija matrice,
- 2) došlo je do elastične deformacije matrice uslijed velikih naprezanja tijekom obrade.

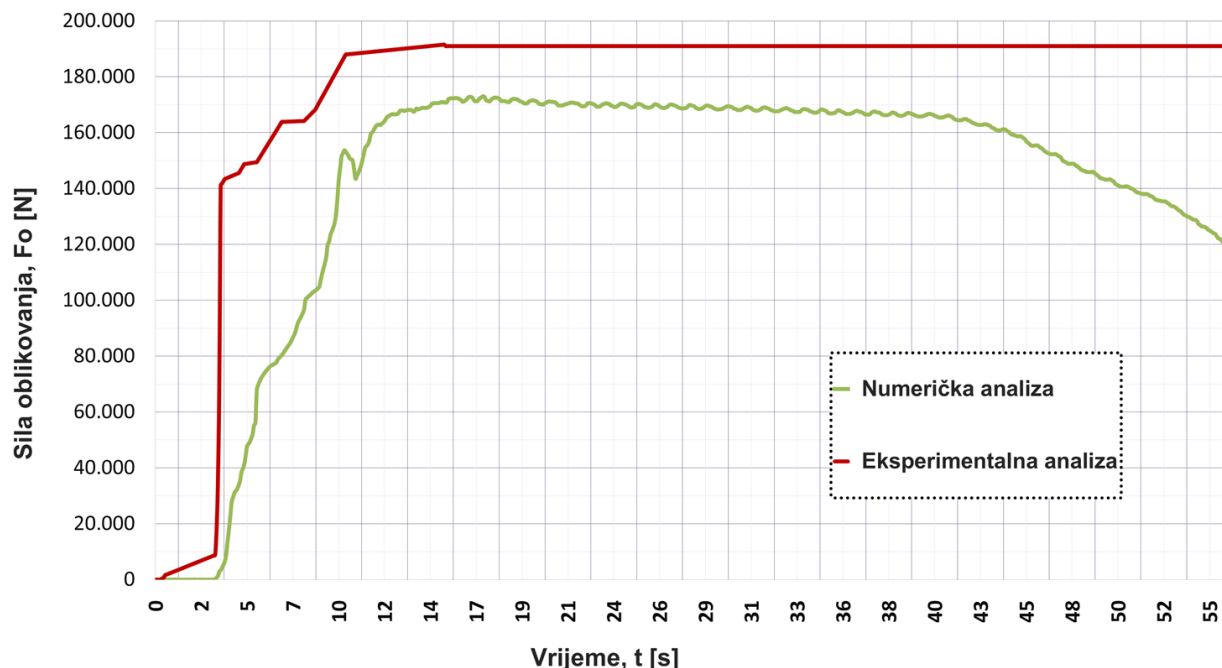


Slika 49 – Curenje materijala uzorka zbog deformacije matrice

Matrica korištena u ovom eksperimentu već je prije bila korištena u drugim ispitivanjima koja su bila provođena na puno čvršćim materijalima od čistog aluminija pa je moguće prethodno oštećenje plastičnom deformacijom. Kako je objašnjeno u radu, ukoliko se kutnom ekstruzijom u matrici s kutom od 90° obrađuju materijali visoke čvrstoće, može doći do plastične deformacije matrice. Plastično deformirana matrica uzrokovala je

curenje uzorka te je bitno napomenuti da se u tom slučaju maksimalna sila oblikovanja može povećati čak i do 30%, stoga treba pripaziti prilikom usporedbe sila očitanih u ovom eksperimentu i onih dobivenih numeričkim simulacijama.

Graf prikazan na Slici 50 prikazuje usporedbu maksimalne sile dobivene eksperimentalnom analizom (srednja vrijednost maksimalnih očitanih sila tijekom obrade pet jednakih uzoraka) s podacima o sili u vremenu dobivenih numeričkom analizom.

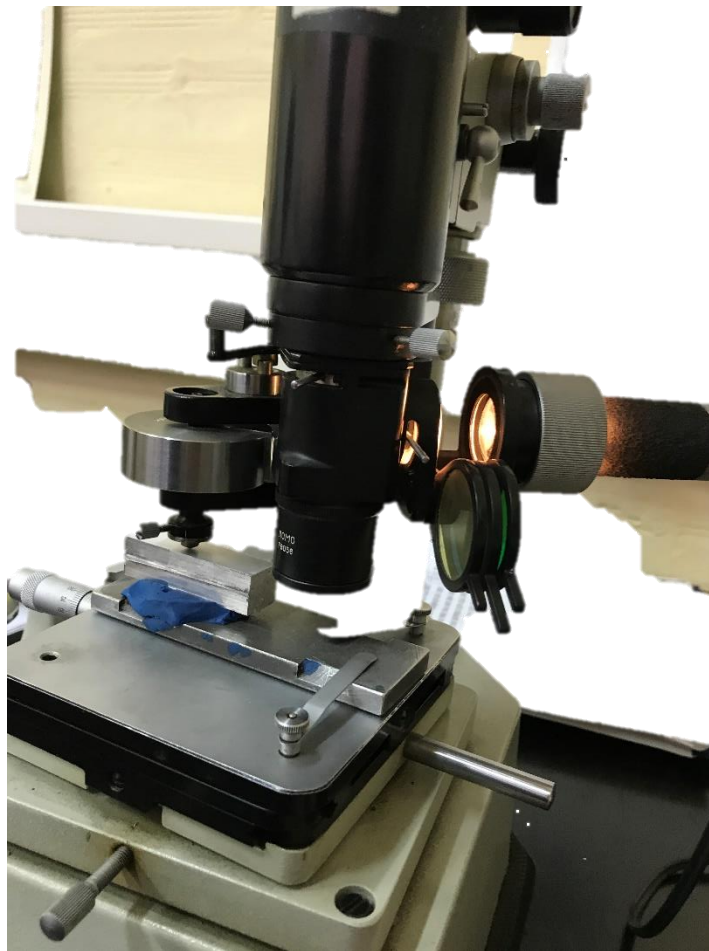


Slika 50 – Usporedba sila oblikovanja dobivenih eksperimentalnom i numeričkom analizom

Sila očitana s hidraulične preše doseže maksimum od 191 kN dok je provođenjem kutne ekstruzije numeričkom analizom, sila postigla maksimum u iznosu od 173 kN. Kao što je i očekivano, sila izmjerena tijekom eksperimenta je za 10% veća od one dobivene numeričkom analizom. No, postoji još jedan faktor osim curenja materijala koji je utjecao na tu razliku. Mazivo korišteno prilikom eksperimenta zasigurno je smanjilo trenje između uzorka, matrice i žiga. Međutim, još je uvijek postojao određeni koeficijent trenja između tih dijelova. Kako je numerička analiza provedena s pretpostavkom da nema nikakvog trenja u promatranom sustavu, očito je da je određeni dio od tih 10% razlike u silama, uzrokovalo trenje.

4.2. Usporedba tvrdoće uzorka

Druga svrha eksperimentalnog dijela rada je usporedba tvrdoće uzorka prije i poslije kutne ekstruzije. Tvrdoća uzorka od čistog aluminija izmjerena je prije i poslije obrade u alatu s kutom između kanala matrice od 90° . Mjerena je tvrdoća Vickersovom⁵ metodom (Slika 51) i to na pet različitih mjesta po duljini ispitnog uzorka, a podaci su prikazani u Tablici 7.



Slika 51 – Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom

⁵ Vickersova metoda mjerenja tvrdoće temelji se na utiskivanju dijamantne piramide u površinu materijala te se na temelju otiska nastalom na toj površini određuje tvrdoća samog materijala.

Tablica 7 – Izmjerena tvrdoća prije i poslije kutne ekstruzije

Mjesto na uzorku	Tvrdoća uzorka prije kutne ekstruzije, HV	Tvrdoća uzorka nakon kutne ekstruzije, HV
1.	35,0	45,9
2.	37,1	55,0
3.	33,4	50,4
4.	35,6	52,6
5.	30,5	49,0
Srednja vrijednost, HV	34,3	50,6

Iz provedenog eksperimenta ustanovljeno je da se kutnom ekstruzijom može povoljno utjecati na tvrdoću materijala. Usporedbom rezultata mjerenja tvrdoće na čistom aluminiju prije i poslije deformiranja u alatu s kutom između kanala matrice od 90°, može se primijetiti značajan porast tvrdoće nakon samo jednog prolaska. Na uzorku je izmjerena tvrdoća u iznosu od 34,3 HV prije obrade, dok je nakon obrade izmjerena srednja vrijednost od 50,6 HV. Povećanje od 47,5% predstavlja veliku promjenu u tvrdoći materijala.

5. ZAKLJUČAK

U radu su numeričkim analizama i eksperimentalnim ispitivanjima dokazane pozitivne strane postupka kutne ekstruzije, no primijećeni su i mali nedostaci. Provedenim dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim numeričkim analizama potvrđena je ovisnost deformacije nametnute obrađivanom materijalu, o kutu Φ – kutu između ulaznog i izlaznog kanala matrice. Simulacije su provedene u sveukupno osam slučajeva, po četiri u dvodimenzionalnom i trodimenzionalnom sustavu i to za slijedeće iznose kuta Φ : 90°, 110°, 125°, 135°. Kut Ψ (kut na vanjskom dijelu spoja kanala matrice) izračunat je na temelju geometrija matrica prikazanih u analizi svakog od slučaja, a materijal je u svim ispitivanjima bio komercijalno čisti aluminij. Već i samom dvodimenzionalnom analizom dobiveni su zadovoljavajući rezultati i vrijednosti približno jednake onima izračunatim pomoću izraza (1), no deformacija dobivena simulacijama je u nekim slučajevima veća za skoro 70% od izračunate. Trodimenzionalnom analizom maksimalna razlika u deformacijama s izračunatim vrijednostima svedena je na svega 17%, što upućuje na točnost provedenih numeričkih analiza u trodimenzionalnom sustavu. Nadalje, usporedbom dobivenih rezultata jasno se primjećuje smanjenje maksimalne postignute ekvivalentne plastične deformacije u materijalu s porastom kuta između kanala matrice.

Korištenjem alata za kutnu ekstruziju s različitim vrijednostima kuta između kanala matrice, otvaraju se vrata širokom spektru materijala koji se mogu obraditi ovim postupkom. Matrica s manjim kutom Φ koristi se za obradu materijala čija čvrstoća nije prevelika i neće uzrokovati nepoželjnu deformaciju alata. S druge strane, matrica s većim kutom Φ koristi se kod obrade čvršćih materijala kao što su neke titanove legure. Na taj način se u materijalu ostvaruje manja deformacija, ali se postupak može ponoviti u više faza jer poprečni presjek obratka ne doživljava nikakvu promjenu. Ponavljanjem postupka postiže se velika ukupna deformacija, a samim time kristalna zrna mogu biti smanjena na svega par stotina nanometara. Na taj način se postiže sitnozrnata mikrostruktura, a ona je temelj za poboljšanje mehaničkih svojstava materijala koji se obrađuje.

U radu su osim deformacija, uspoređene i maksimalne sile oblikovanja očitane prilikom eksperimenta s onima dobivenim u numeričkoj analizi. Zbog nepoželjne pojave curenja

materijala tijekom eksperimenta, ali i zbog zanemarivanja trenja u samim simulacijama, zabilježena je 10% veća sila oblikovanja prilikom provedbe eksperimenta.

Na poslijetku je provedeno ispitivanje tvrdoće uzorka od čistog aluminija. Točnije, uspoređene su vrijednosti tvrdoće (mjerene Vickersovom metodom) prije i poslije obrade kutnom ekstruzijom. Zabilježeno je povećanje tvrdoće za skoro 50%, što predstavlja značajno poboljšanje i još jedan od povoljnih utjecaja procesa kutne ekstruzije na mehanička svojstva materijala.

LITERATURA

- [1] Z. Horita, M. Furukawa, M. Nemoto, T.G. Langdon: Development of fine grained structures using severe plastic deformation, Japan, USA, 2000.
- [2] H. Seop Kim: Finite element analysis of equal channel angular pressing using a round corner die, Department of Metallurgical Engineering, South Korea, 2001.
- [3] Sorić, J.: Metoda konačnih elemenata, Golden marketing, Zagreb, 2004.
- [4] Programski paket Abaqus 6.13-1 (Student Edition), Documentation & User's Guide, Dassault Systemes
- [5] George E. Totten, D. Scott MacKenzie: Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes
- [6] <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=9b89488c8aa84e91b6825ed9a08c5a84&ckck=1> (30.5.2017.)
- [7] Doege, E., Meyer-Nolkemper, H., and Saeed, I.: Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe. Hanser Verlag Meunchen Wien, 1986.

PRILOZI

1. CD-R disk